

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí

Návrh prefabrikovaných mostních nosníků

Design of precast bridge beams

Student:

Bc. Jan Anton

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Pavlína Matečková, Ph.D.

Ostrava 2019

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Jan Anton

Studijní program:

N3607 Stavební inženýrství

Studijní obor:

3607T037 Konstrukce staveb

Téma:

Návrh prefabrikovaných mostních nosníků
Design of precast bridge beams

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

V diplomové práci se navrhne předpjatý prefabrikovaný mostní trámový nosník s variantním rozpětím 15 m, 20 m a 25 m. V softwaru na bázi metody konečných prvků budou stanoveny účinky zatížení pro modelový mostní objekt. Mostní nosníky budou navrženy z běžně používaného betonu a z vysoko pevnostního betonu (C90/105). Posouzeny budou mezní stavy únosnosti i použitelnosti v relevantních časových úsecích. Pro navrhované nosníky bude zpracován výkres tvaru, výkres předpínací výztuže a výkres betonářské výztuže.

Seznam doporučené odborné literatury:

ČSN EN 1991 Eurokód 1: Zatížení stavebních konstrukcí.

ČSN EN 1991-2 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - část 2: Zatížení mostů dopravou

ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí, Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.

ČSN EN 1992-2 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí, Část 2: Betonové mosty - Navrhování a konstrukční zásady

Šafář, R. a kol.: Betonové mosty 1, přednášky. Nakladatelství ČVUT, 2010

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Pavlína Matečková, Ph.D.**

Datum zadání: 28.02.2019

Datum odevzdání: 29.11.2019



doc. Ing. Antonín Lokaj, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucí diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne.....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mě požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne.....

.....

podpis studenta

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

BC. ANTON, J. *Návrh prefabrikovaných mostních nosníků: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2019

Cílem této diplomové práce je návrh prefabrikovaných mostních nosníků. Tato diplomová práce se zaměřuje především na statický výpočet nosné konstrukce jednopólového mostu, a to především předpjatých prefabrikovaných mostních nosníků pro variantní rozpětí 15 m, 20 m a 25 m. Předpjaté nosníky budou navrženy z běžně používaného betonu C55/67 a z vysoko pevnostního betonu C90/105. Příloha obsahuje výkresovou část, ve které je zpracován výkres tvaru, výkres předpínací výztuže a výkres betonářské výztuže. Tato práce je v rozsahu 100 stran.

Klíčová slova

Předpjatý beton, prefabrikovaný nosník, železobetonová konstrukce, mostní nosník

ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS

ANTON, J. *Design of precast bridge beams: Diploma Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, 2019

The aim of this thesis is a design of precast bridge beams. This diploma thesis focuses mainly on static calculation of load-bearing structure of single-pole bridge, especially prestressed prefabricated bridge beams for variant spans of 15 m, 20 m and 25 m. Prestressed beams will be designed from commonly used concrete C55/67 and from high-strength concrete C90/105. The annex contains the drawing part in which the shape drawing, drawing of prestressing reinforcement and drawing of concrete reinforcement are processed. This thesis is in range of 100 pages.

Key words

Prestressed concrete, precast beam, reinforced concrete structures, bridge beam

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	12
1 Úvod	14
2 Model mostního objektu	14
2.1 Popis modelového mostního objektu.....	14
2.2 Tvorba modelu v programu Dlubal RFEM.....	15
2.3 Zatížení	16
2.3.1 Vlastní tíha	16
2.3.2 Ostatní stálé zatížení	17
2.3.3 Zatížení dopravou	17
2.4 Kombinace zatížení	20
2.5 Materiály	22
2.5.1 Beton	22
2.5.2 Předpínací výztuž.....	22
2.5.3 Betonářská výztuž.....	22
3 Postup výpočtu.....	23
3.1 Materiálové charakteristiky.....	23
3.1.1 Beton	23
3.1.2 Předpínací výztuž.....	24
3.2 Zatížení	25
3.3 Návrh průřezu a předpětí.....	25
3.4 Kotvení předem předpjaté výztuže	26
3.5 Ztráty předpětí	28
3.5.1 Krátkodobé ztráty	28
3.5.2 Dlouhodobé ztráty.....	30
3.6 Mezní stav použitelnosti	31
3.6.1 Omezení napětí	31

3.6.2	Omezení trhlin	32
3.6.3	Přetvoření	32
3.7	Mezní stav únosnosti	32
3.7.1	Únosnost v ohybu-Metoda mezní rovnováhy	33
3.7.2	Únosnost ve smyku.....	33
4	Návrh a posouzení nosníků L=15 m.....	34
4.1	Beton C55/67.....	35
4.1.1	Vnitřní síly.....	35
4.1.2	Ideální průřez.....	37
4.1.3	Kotvení předem předpjaté výztuže	38
4.1.4	Ztráty předpětí	38
4.1.5	Mezní stav použitelnosti	40
4.1.6	Mezní stav únosnosti.....	42
4.2	Beton C90/105.....	43
4.2.1	Vnitřní síly.....	43
4.2.2	Ideální průřez.....	45
4.2.3	Kotvení předem předpjaté výztuže	46
4.2.4	Ztráty předpětí	46
4.2.5	Mezní stav použitelnosti	48
4.2.6	Mezní stav únosnosti.....	50
4.3	Srovnání nosníků pro rozpětí L=15 m	51
5	Návrh a posouzení nosníku L=20 m.....	54
5.1	Beton C55/67.....	55
5.1.1	Vnitřní síly.....	55
5.1.2	Návrh průřezu a předpětí.....	57
5.1.3	Kotvení předem předpjaté výztuže	58
5.1.4	Ztráty předpětí	58

5.1.5	Mezní stav použitelnosti	60
5.1.6	Mezní stav únosnosti.....	62
5.2	Beton C90/105.....	63
5.2.1	Vnitřní síly.....	63
5.2.2	Ideální průřez.....	64
5.2.3	Kotvení předem předpjaté výztuže	65
5.2.4	Ztráty předpětí	66
5.2.5	Mezní stav použitelnosti	68
5.2.6	Mezní stav únosnosti.....	70
5.3	Srovnání nosníků pro rozpětí $L=20$ m	71
6	Návrh a posouzení nosníku $L=25$ m.....	74
6.1	Beton C55/67.....	75
6.1.1	Vnitřní síly.....	75
6.1.2	Ideální průřez.....	77
6.1.3	Kotvení předem předpjaté výztuže	77
6.1.4	Ztráty předpětí	78
6.1.5	Mezní stav použitelnosti	80
6.1.6	Mezní stav únosnosti.....	82
6.2	C90/105.....	83
6.2.1	Vnitřní síly.....	83
6.2.2	Ideální průřez.....	84
6.2.3	Kotvení předem předpjaté výztuže	85
6.2.4	Ztráty předpětí	86
6.2.5	Mezní stav použitelnosti	87
6.2.6	Mezní stav použitelnosti	89
6.3	Srovnání nosníků pro rozpětí $L=25$ m	90
7	Závěr	93

Seznam použité literatury	96
Seznam obrázků a tabulek.....	96
Seznam příloh.....	99

Seznam použitých značek a symbolů

A_c	průřezová plocha betonu	[mm ²]
A_s	plocha výztuže	[mm ²]
A_{sw}	plocha výztuže třmínku	[mm ²]
F_s	síla ve výztuži	[kN]
M_{Ed}	návrhová hodnota ohybového momentu	[kNm]
M_{Rd}	návrhová hodnota momentu únosnosti	[kNm]
V_{ed}	návrhová posouvající síla	[kN]
$V_{Rd,c}$	návrhová únosnost ve smyku prvku bez smykové výztuže	[kN]
$V_{Rd,s}$	posouvající síla, kterou přenesou smyková výztuž na mezi kluzu	[kN]
b	šířka	[m]
c_{dev}	toleranční zvětšení krytí	[mm]
c_{min}	minimální krycí vrstva s přihlédnutím k požadavku soudržnosti	[mm]
c_{nom}	jmenovitá hodnota tloušťky betonové krycí vrstvy	[mm]
$c_{min,dur}$	minimální krycí vrstva s přihlédnutím k podmínkám prostředí	[mm]
d	účinná výška průřezu	[mm]
d_g	maximální průměr zrn kameniva	[mm]
f_{bd}	návrhová hodnota mezního napětí v soudržnosti	[MPa]
f_{cd}	návrhová válcová pevnost betonu v tlaku	[MPa]
f_{ck}	charakteristická válcová pevnost betonu v tlaku	[MPa]
$f_{ctk0,05}$	charakteristická pevnost betonu v dostředném tahu – 5% kvantil	[MPa]
f_{ctd}	návrhová pevnost betonu v tahu	[MPa]
f_{ctm}	pevnost betonu v tahu	[MPa]
f_{yd}	návrhová hodnota meze kluzu oceli	[MPa]
f_{yk}	charakteristická hodnota meze kluzu oceli	[MPa]
f_{ywd}	návrhová hodnota meze kluzu třmínkové výztuže	[MPa]
g_k	charakteristická hodnota stálého zatížení	[kN/m ²]

$l_{b,rqd}$	základní kotevní délka	[mm]
q_k	charakteristická hodnota užitého zatížení	[kN/m ²]
x	výška tlačené oblasti	[m]
z	rameno vnitřních sil	[m]
α_{ct}	součinitel zohledňující dlouhodobé účinky na pevnost v tlaku a nepříznivé účinky vyplývající ze způsobu zatěžování	[-]
γ_c	součinitel spolehlivosti betonu	[-]
γ_s	součinitel spolehlivosti oceli	[-]
η_1	vliv soudržnosti	[-]
η_2	vliv průměru prutu	[-]
θ	úhel tlačných diagonál	[°]
λ	součinitel definující efektivní výšku tlačené zóny	[-]
ρ	objemová hmotnost	[kg/m ³]

Další značky jsou definovány při prvním výskytu.

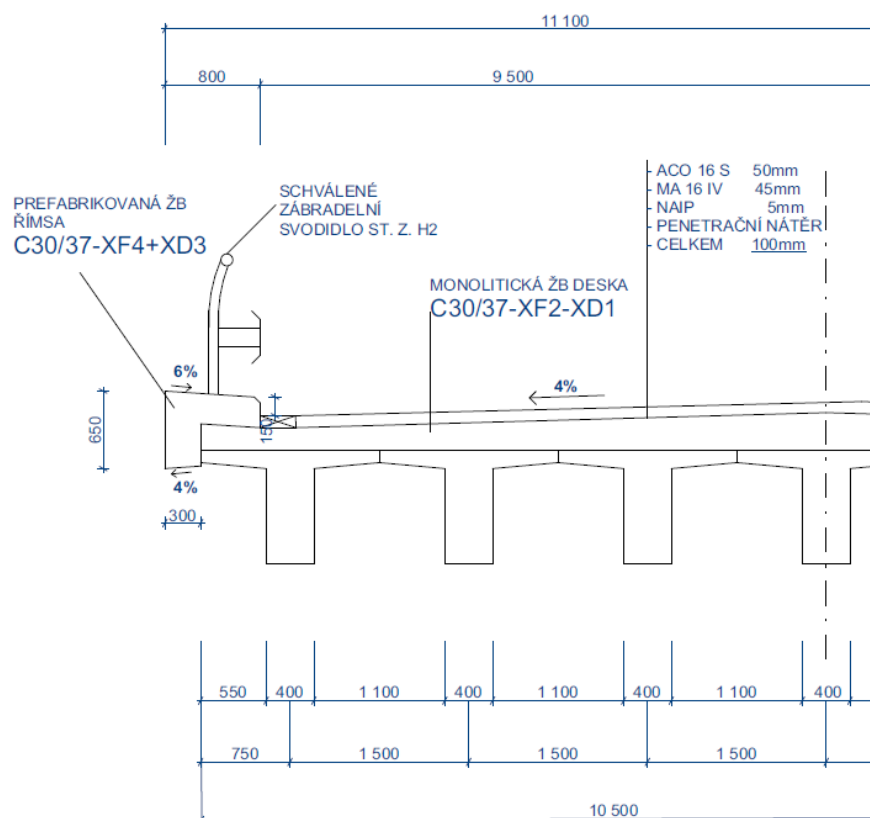
1 Úvod

Náplní této diplomové práce je navrhnout a následně posoudit předpjaté prefabrikované mostní nosníky na mezní stav únosnosti a mezní stav použitelnosti dle platné evropské normy EC2 [3,4]. V rámci diplomové práce se budeme zabývat pouze návrhem hlavní nosné konstrukce mostu, která byla vymodelována v programu Dlubal RFEM [5] pro jednotlivá rozpětí mostu. Pro každé rozpětí je nosník navržen z betonu C55/67 a vysokopevnostního betonu C90/105. Veškeré zásady při navrhování jsou dle ČSN EN 1990 [6]. Součástí tohoto projektu je popis modelového mostního objektu. Následuje výpočet zatížení dle EC1 [1,2] a posudek mostních nosníků. Součástí projektu je taktéž výkresová dokumentace, konkrétně výkresy tvaru, výkresy předpínací výztuže a výkresy betonářské výztuže.

2 Model mostního objektu

2.1 Popis modelového mostního objektu

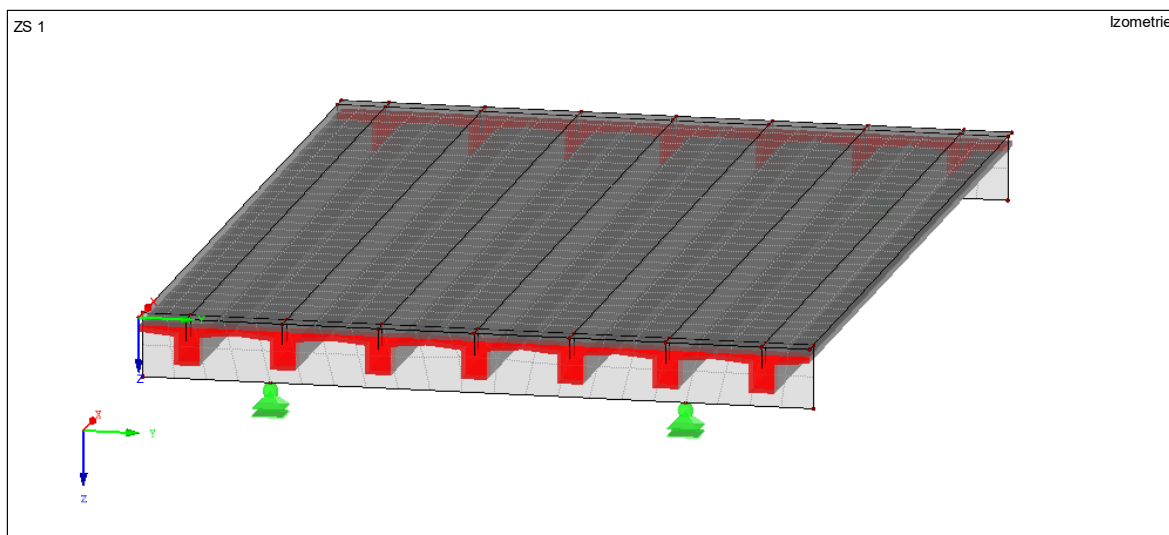
V diplomové práci byl zvolen modelový mostní objekt, který převádí komunikaci šířky S9,5. Hlavní nosnou konstrukci tvoří 7 ks předpjatých prefabrikovaných T-nosníků spřažených s monolitickou deskou tloušťky 0,25 m. Délka prefabrikátů je proměnlivá a to 15, 20 a 25 m. Šířka nosné konstrukce mostu je 10,5 m. Šířka horní příruby T-nosníků je 1,5 m a její tloušťka je proměnlivá od 0,15 do 0,1 m. Šířka stojiny nosníků je 0,4 m. Výška nosníku je proměnná v závislosti na rozpětí. Pro každé rozpětí byla zvolena pouze jedna výška nosníku, aby bylo možno srovnat rozdíl v únosnosti pro jednotlivé druhy betonu. Z hlediska statického působení se jedná o prosté nosníky o 1 poli.



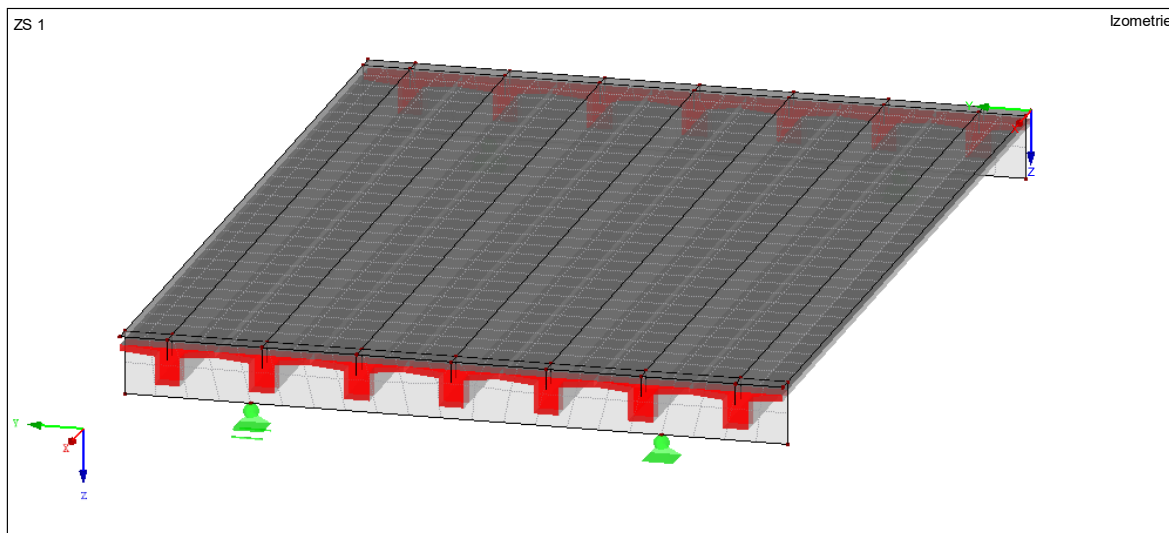
Obr. 2.1 - Příčný řez mostu

2.2 Tvorba modelu v programu Dlubal RFEM

V programu Dlubal RFEM [5] byl vytvořen 3D model pro stanovení účinků zatížení pro jednotlivé nosníky. Model byl vytvořen pomocí desky s excentrickými žebry. Ztužení v příčném směru je tvořeno příčníky, na kterých jsou nosníky uloženy. Příčníky jsou uloženy na ložiscích. Podepření bylo zvoleno tak, aby umožňovalo volné deformace v příčném a podélném směru. Celkem bylo vytvořeno 6 modelů.



Obr. 2.2 - Podepření levá strana mostu [5]



Obr. 2.3 - Podepření pravá strana mostu [5]

2.3 Zatížení

2.3.1 Vlastní tíha

Zatížení vlastní tíhou je spočítáno programem RFEM [5]. Uvažované objemové tíhy:

Tab. 2.1 - Uvažované objemové tíhy

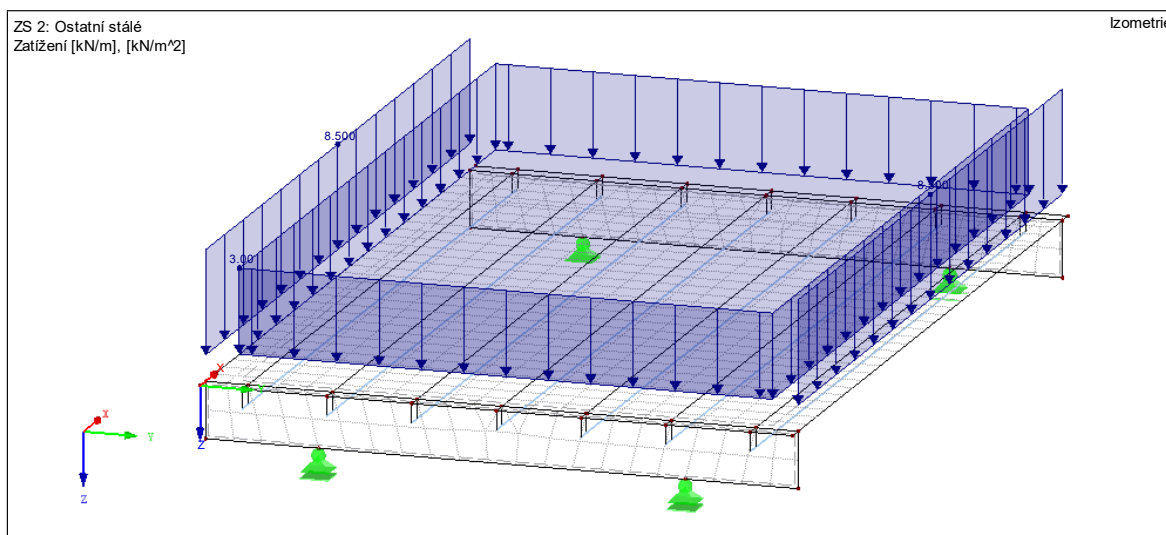
Vlastní tíha			
Objemová hmotnost:			
Železobeton	$\gamma =$	25	[kN/m ³]
Předpjatý beton	$\gamma =$	26	[kN/m ³]

2.3.2 Ostatní stálé zatížení

Ostatní stálé zatížení je tvořeno mostním svrškem a římsou se svodidly.

Tab. 2.2 - Ostatní stálé zatížení

Ostatní stálé			
	A[m ²]	γ[-]	[kN/m]
Římsa	0,32	25	8
Svodidlo	-	-	0,5
Σ			8,5
Vozovka	0,12	24	3



Obr. 2.4 - ZS 2-Ostatní stálé zatížení

2.3.3 Zatížení dopravou

ČSN EN 1991-2 [4] doporučuje modely zatížení pro stanovení účinků silniční dopravy pro ověření mezních stavů únosnosti a pro některá ověření mezních stavů použitelnosti. Pro svislá zatížení jsou doporučeny čtyři zatěžovací modely:

Model zatížení 1 (LM1), který se skládá ze soustředěných a rovnoměrných zatížení, jež zahrnují většinu účinků od provozu osobních a nákladních vozidel. Model se použije pro globální i lokální posouzení.

Model zatížení 2 (LM2), který představuje zatížení jednou nápravou na definované kontaktní ploše pneumatik. Model zahrnuje dynamické účinky normální dopravy na krátkých nosných prvcích. Tento model může být rozhodující při zatěžovacích délkách od 3 do 7 m.

Model zatížení 3 (LM3) modelující zvláštní vozidla, která mohou mít povolení jezdit po trasách s výjimečným zatížením. Model se použije pro celková a lokální posouzení.

Model zatížení 4 (LM4), který modeluje zatížení davem lidí, se používá pro celková ověření.

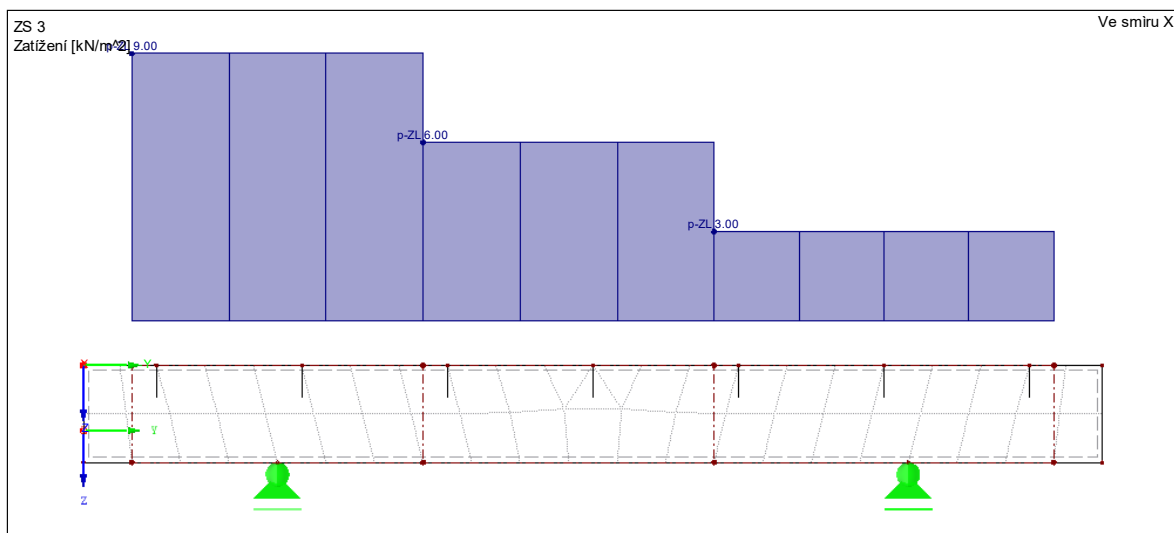
Ve výpočtu byl použit model zatížení 1 (LM1). Model se skládá se dvou dílčích soustav:

Soustředěné zatížení od dvojnápravy (tandem system – TS); každá náprava je o síle $\alpha_q Q_k$, kde α_q je regulační součinitel. V jednom zatěžovacím pruhu se uvažuje pouze jedna kompletní dvojnáprava. Každá náprava dvojnápravy má dvě identická kola, z nichž každé vyvozuje zatížení $0,5\alpha_q Q_k$ na čtvercové ploše o straně 0,40 m.

Rovnoměrné zatížení (uniformly distributed load – UDL) o tíze $\alpha_q q_k$ na čtverečný metr nepříznivě působících příčinkových ploch, kde α_q je regulační součinitel.

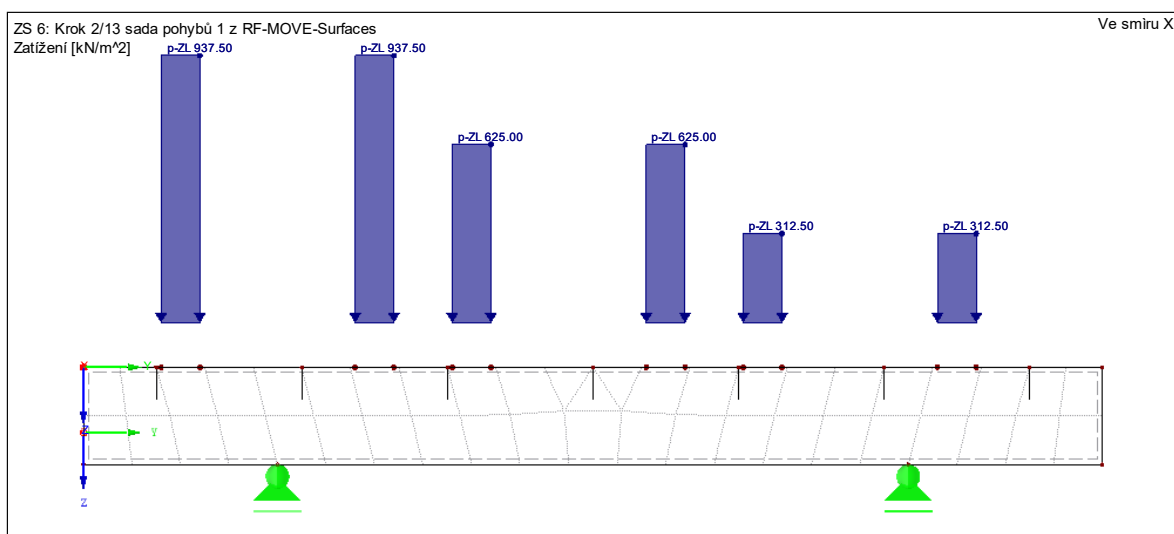
Tab. 2.3 - Zatížení LM1

Doprava				
LM1				
Šířka komunikace		9,5	[m]	
Šířka pruhu		3	[m]	
Zbytkový pruh		0,5	[m]	
Regulační souč.		$\alpha[-]$		
Q1	150	1	150	[kN]
Q2	100	1	100	[kN]
Q3	50	1	50	[kN]
q1	9	1	9	[kN/m]
q2	2,5	2,4	6	[kN/m]
q3	2,5	1,2	3	[kN/m]
qzb	2,5	1,2	3	[kN/m]



Obr. 2.5 - Zatížení dopravou LM1-UDL

Pohyblivé zatížení od dopravy bylo do modelu vloženo pomocí přídatného modulu RF-MOVE-Surfaces programu RFEM [5]. Na Obr. 2.6 lze vidět příčné uspořádání sil. Zatížení bylo uvažováno na ploše 0,4x0,4 m. Na Obr. 2.7 lze vidět krok sady pohybů 5/13. Jednotlivé kroky byly zvoleny ve vzdálenosti 1 m.



Obr. 2.6 - Zatížení dopravou LM1-TS

Tab. 2.4 - Kombinační součinitele

Kombinační součinitele						
STR 6.10a	γ_{inf}	γ_{sup}	ψ	ξ_1	ξ_2	
G1	1	1,35	1	1	1	1
OST	1	1,35	1	1	1	1
LM1-MQ	0	1,35	0,4	1	1	1
LM1-Mq	0	1,35	0,75	1	1	1
STR 6.10b	γ_{inf}	γ_{sup}	ψ	ξ_1	ξ_2	
G1	1	1,15	1	1	1	1
OST	1	1,15	1	1	1	1
LM1-MQ	0	1,35	1	1	1	1
LM1-Mq	0	1,35	1	1	1	1
STR 6.10	γ_{inf}	γ_{sup}	ψ	ξ_1	ξ_2	
G1	1	1,35	1	1	1	1
OST	1	1,35	1	1	1	1
LM1-MQ	0	1,35	1	1	1	1
LM1-Mq	0	1,35	1	1	1	1
Charakteristická	γ_{inf}	γ_{sup}	ψ	ξ_1	ξ_2	
G1	1	1	1	1	1	1
OST	1	1	1	1	1	1
LM1-MQ	0	1	1	1	1	1
LM1-Mq	0	1	1	1	1	1
Častá	γ_{inf}	γ_{sup}	ψ	ξ_1	ξ_2	
G1	1	1	1	1	1	1
OST	1	1	1	1	1	1
LM1-MQ	0	1	0,75	1	1	1
LM1-Mq	0	1	0,4	1	1	1
Kvazistálá	γ_{inf}	γ_{sup}	ψ	ξ_1	ξ_2	
G1	1	1	1	1	1	1
OST	1	1	1	1	1	1
LM1-MQ	0	1	0	1	1	1
LM1-Mq	0	1	0	1	1	1

2.5 Materiály

2.5.1 Beton

Tab. 2.5 - Pevnostní třídy betonu

Třída	f_{ck} [MPa]	$f_{ck,cube}$ [MPa]	f_{cm} [MPa]	f_{ctm} [MPa]	$f_{ctk,0,05}$ [MPa]	$f_{ctk,0,95}$ [MPa]	E_{cm} [MPa]
C12/15	12	15	20	1,6	1,1	2	27000
C16/20	16	20	24	1,9	1,3	2,5	29000
C20/25	20	25	28	2,2	1,5	2,9	30000
C25/30	25	30	33	2,6	1,8	3,3	31000
C30/37	30	37	38	2,9	2	3,8	33000
C35/45	35	45	43	3,2	2,2	4,2	34000
C40/50	40	50	48	3,5	2,5	4,6	35000
C45/55	45	55	53	3,8	2,7	4,9	36000
C50/60	50	60	58	4,1	2,9	5,3	37000
C55/67	55	67	63	4,2	3	5,5	38000
C60/75	60	75	68	4,4	3,1	5,7	39000
C70/85	70	85	78	4,6	3,2	6	41000
C80/95	80	95	88	4,8	3,4	6,3	42000
C90/105	90	105	98	5	3,5	6,6	44000

2.5.2 Předpínací výztuž

Tab. 2.6 - Pevnostní třídy předpínací výztuže

Třída	d [mm]	f_{pk} [MPa]	$f_{pk,0,1,k}$ [MPa]	E_p [MPa]	A_p [mm ²]	M [g/m]
Y1770S7-15,3	15,3	1770	1560	195000	140	1093
Y1770S7-15,7	15,7	1770	1560	195000	150	1172
Y1860S7-15,3	15,3	1860	1640	195000	140	1093
Y1860S7-15,7	15,7	1860	1640	195000	150	1172

2.5.3 Betonářská výztuž

Betonářská výztuž byla použita B500B. V rámci diplomové práce byla počítána pouze smyková výztuž. Výztuž uvedena ve výkresech byla navržena dle konstrukčních zásad.

3 Postup výpočtu

3.1 Materiálové charakteristiky

3.1.1 Beton

Návrhová pevnost betonu v tlaku:

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_c} \quad (3.1)$$

Návrhová pevnost betonu v tahu:

$$f_{ctd} = \frac{\alpha_{ct} \cdot f_{ctm}}{\gamma_c} \quad (3.2)$$

Tab. 3.1 - Návrhové pevnosti betonu C30/37

Beton		C30/37
fck	[MPa]	30
fck,cube	[MPa]	37
fc,m	[MPa]	38
fctm	[MPa]	2,9
fctk,0,05	[MPa]	2
fctk,0,95	[MPa]	3,8
Ecm	[MPa]	33000
α_{cc}	[-]	0,85
α_{ct}	[-]	1
$\gamma_c(\text{ULS})$	[-]	1,5
fcd(ULS)	[MPa]	17,00
fc,t,d(ULS)	[MPa]	1,33
$\gamma_c(\text{SLS})$	[-]	1
fcd(SLS)	[MPa]	25,5
fc,t,d(SLS)	[MPa]	2

Tab. 3.2 - Návrhové pevnosti betonu C55/67

Beton		C55/67
fck	[MPa]	55
fck,cube	[MPa]	67
fc,m	[MPa]	63
fctm	[MPa]	4,2
fctk,0,05	[MPa]	3
fctk,0,95	[MPa]	5,5
Ecm	[MPa]	38000
αcc	[-]	0,85
αct	[-]	1
γc(ULS)	[-]	1,5
fcd(ULS)	[MPa]	31,17
fc,t,d(ULS)	[MPa]	2
γc(SLS)	[-]	1
fcd(SLS)	[MPa]	46,75
fc,t,d(SLS)	[MPa]	3

Tab. 3.3 - Návrhové pevnosti betonu C90/105

Beton		C90/105
fck	[MPa]	90
fck,cube	[MPa]	105
fc,m	[MPa]	98
fctm	[MPa]	5
fctk,0,05	[MPa]	3,5
fctk,0,95	[MPa]	6,6
Ecm	[MPa]	44000
αcc	[-]	0,85
αct	[-]	1
γc(ULS)	[-]	1,5
fcd(ULS)	[MPa]	51,00
fc,t,d(ULS)	[MPa]	2,33
γc(SLS)	[-]	1
fcd(SLS)	[MPa]	76,5
fc,t,d(SLS)	[MPa]	3,5

3.1.2 Předpínací výztuž

Návrhová pevnost

$$f_{pd} = \frac{f_{p,0,1,k}}{\gamma_p} \quad (3.3)$$

Maximální přípustné napětí v předpínací výztuži během předpínání

$$\sigma_{p,max} = \min\{0,8f_{pk}; 0,9f_{p,0,1,k}\} \quad (3.4)$$

Maximální přípustné napětí v předpínací výztuži besprostředně po vnesení předpětí do betonu

$$\sigma_{p,m0x} = \min\{0,75f_{pk}; 0,85f_{p,0,1,k}\} \quad (3.5)$$

Odhad napětí po krátkodobých ztrátách

$$\sigma_{pa} = 0,85 \cdot \sigma_{p,max} \quad (3.6)$$

Odhad napětí po dlouhodobých ztrátách

$$\sigma_{p\infty} = 0,85 \cdot \sigma_{pa} \quad (3.7)$$

Tab. 3.4 - Předpínací výztuž Y1860 S7-15,7

Předpínací výztuž		Y1860 S7-15,7
Dp,1	[mm]	15,7
Ap,1	[mm^2]	150
Relax. Tř.	[-]	2
ρ_{1000}	[%]	2,5
f _{p,k}	[MPa]	1860
f _{p,0,1,k}	[MPa]	1640
$\gamma_p(\text{ULS})$	[-]	1,15
f _{p,d(ULS)}	[MPa]	1426,09
$\gamma_p(\text{SLS})$	[-]	1
f _{p,d(SLS)}	[MPa]	1640
E _p	[GPa]	195
$\sigma_{p,max}$	[Mpa]	1488
$\sigma_{p,m,0(x)}$	[Mpa]	1394
$\sigma_{p,a}$	[Mpa]	1264,8
$\sigma_{p,\infty}$	[Mpa]	1075,08

3.2 Zatížení

Z modelu vytvořeném v programu RFEM [5], byly převzaty výsledky kombinací, které byly překontrolovány podle kombinačních pravidel uvedených v kapitole 2.4.

3.3 Návrh průřezu a předpětí

Navržený průřez a velikost předpínací síly bude uvedena u každého rozpětí zvlášť. Při návrhu předpínací síly bylo využito metody Satisfy the conditions of stress limitation (SLS) – pomocí podmínek omezení napětí (MSP)

$$\sigma_{c,d} \leq 0,6 \cdot f_{ck(t)} \quad (3.8)$$

$$\sigma_{c,h} \leq f_{ctm(t)} \quad (3.9)$$

Pro předem předpjaté konstrukce můžeme zvýšit hodnotu pro dočasnou situaci až na $0,7 \cdot f_{ck(t)}$. Průřez u podpory těmto podmínkám nevyhoví, proto bude provedena separace lan, aby nedošlo ke vzniku podélných trhlin.

$$\sigma_{c,d} = -\frac{P}{A_I} - \frac{P \cdot e}{I_I} \cdot e_p + \frac{M_{g0}}{I_I} e_p \quad (3.10)$$

$$\sigma_{c,h} = -\frac{P}{A_I} + \frac{P \cdot e}{I_I} \cdot e_p - \frac{M_{g0}}{I_I} e_p \quad (3.11)$$

Průřezové charakteristiky ideálního průřezu

$$\alpha_E = \frac{E_p}{E_{cm}} \quad (3.12)$$

$$A_i = A_c + \alpha_E \cdot A_p \quad (3.13)$$

$$t_i = \frac{\alpha_E \cdot A_p \cdot e_p}{A_i} \quad (3.14)$$

$$e_i = e_p - t_i \quad (3.15)$$

$$a_{gi,d} = a_{gc,d} - t_i \quad (3.16)$$

$$a_{gi,h} = a_{gc,h} + t_i \quad (3.17)$$

$$I_i = I_c + A_c t_i^2 + \alpha_E I_p + \alpha_E A_p e_i^2 \quad (3.18)$$

Průřezové charakteristiky ideálního průřezu pro nosník společně s deskou se vypočítají dle stejných vzorců. Vzhledem k tomu, že se v prvku nachází dva různé druhy betonu. Modul pružnosti betonu byl spočítán pomocí váženého průměru (3.19).

$$E_c = \frac{A_1 E_1 + A_2 E_2}{A_c} \quad (3.19)$$

3.4 Kotvení předem předpjaté výztuže

Po uvolnění předpínací výztuže lze předpokládat, že předpětí se do betonu přenáší konstantním napětím v soudržnosti:

$$f_{bpt} = \eta_{p1} \eta_1 \cdot f_{ctd}(t) \quad (3.20)$$

η_{p1} součinitel, který zohledňuje druh předpínací výztuže

$\eta_{p1} = 2,7$ pro dráty s vtisky

$\eta_{p1} = 3,2$ pro 3 drátová a 7 drátová lana

η_1 $\eta_1 = 1,0$ pro dobré podmínky v soudržnosti

$\eta_1 = 0,7$ pro ostatní podmínky

Základní hodnota přenášečí délky (tj. délky, na které se přenese předpětí do průřezu):

$$l_{pt} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \frac{\phi \sigma_{pm0}}{f_{bpt}} \quad (3.21)$$

α_1 $\alpha_1 = 1,0$ při postupném uvolňování

$\alpha_1 = 1,25$ při náhlém uvolňování předpětí

α_2 $\alpha_2 = 0,25$ pro vložky s kruhovým průměrem

$\alpha_2 = 0,19$ pro třídrátová a sedmidrátová lana

Návrhová hodnota přenášečí délky:

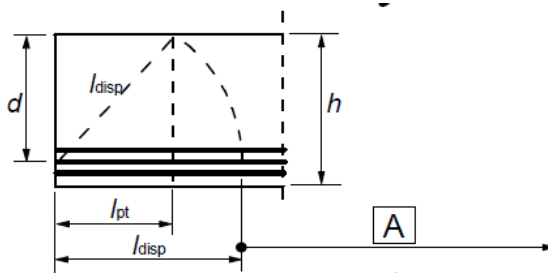
$l_{pt1} = 0,8 \cdot l_{pt}$ (zpravidla pro ověření místních napětí)

$l_{pt2} = 1,2 \cdot l_{pt}$ (zpravidla pro mezní stav únosnosti ve smyku)

Disponibilní hodnota přenášečí délky:

$$l_{disp} = \sqrt{l_{pt}^2 + d^2} \quad (3.22)$$

d účinná výška průřezu



Obr. 3.1 - Přenášečí délky-schéma

3.5 Ztráty předpětí

3.5.1 Krátkodobé ztráty

Krátkodobé (výrobní) ztráty – při napínání předem

- Ztráta pokluzem v kotvě
- Ztráta přetvořením výrobní dráhy
- Ztráta z tepelného ošetřování
- Ztráta relaxací před vnesením předpětí + vliv teploty
- Ztráta pružným přetvořením betonu

3.5.1.1 Ztráta pokluzem v kotvě

$$\Delta\sigma_{pw} = \Delta\sigma_{pa} = -\frac{w \cdot E_p}{l} \quad (3.23)$$

w pokluz v kotvě

E_p modul pružnosti předpínací výztuže

l délka nosníku, délka předpínací dráhy

3.5.1.2 Ztráta přetvořením výrobní dráhy

$$\Delta\sigma_{pa} = -\frac{w \cdot E_p}{l} \quad (3.24)$$

w deformace výrobní dráhy

E_p modul pružnosti předpínací výztuže

l délka nosníku, délka předpínací dráhy

Napětí po zakotvení:

$$\sigma_{p,Al} = \sigma_{p,max} - \Delta\sigma_{pa} - \Delta\sigma_{pw} \quad (3.25)$$

3.5.1.3 Ztráta z tepelného ošetřování

Dle čl. 10.5.2 EN 1992-1-1 [1]

$$\Delta P_\theta = 0,5 \cdot A_p \cdot E_p \cdot \alpha_c (T_{max} - T_0) \quad (3.26)$$

A_p plocha předpínací výztuže

E_p modul pružnosti předpínací výztuže

α_c součinitel teplotní roztažnosti betonu / výztuže $\alpha_c = 10 \cdot 10^{-6}$

$(T_{max} - T_0)$ rozdíl teplot při tepelném ošetřování

3.5.1.4 Ztráta relaxací výztuže před vnesením předpětí

Dle čl. 3.3.2. EN 1992-1-1 [1]

Tři třídy relaxačního chování:

- Třída 1: dráty nebo lana s normální relaxací ($\rho_{1000} = 8\%$)
- Třída 2: dráty nebo lana s nízkou relaxací ($\rho_{1000} = 2,5\%$)
- Třída 3: za tepla válcované upravené tyče ($\rho_{1000} = 4\%$)

Hodnota ρ_{1000} je hodnota ztráty 1000 hodin po napnutí při teplotě 20°C. Provádí se izotermická zkouška relaxace, 1000 hodin je cca 42 dnů.

Předpokládají se lana s nízkou relaxací:

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\Delta\sigma_{pi}} = 0,66 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{9,1 \cdot \mu} \left(\frac{t}{1000} \right)^{0,75(1-\mu)} 10^{-5} \quad (3.27)$$

$$\mu = \frac{\sigma_{Al}}{f_{pk}} \quad (3.28)$$

$\rho_{1000} = 2,5\%$ pro lana s nízkou relaxací

σ_{Al} maximální tahové napětí působící ve výztuži, zmenšené o okamžité ztráty vznikající v průběhu napínání

t doba po napnutí [hod.]

Při tepelném ošetřování betonu je třeba zohlednit také vliv teploty na relaxaci. V EN 1992-1-1 [1] je to podle článku 10.3.2.1. zohledněno pomocí zvýšeného ekvivalentního času.

$$t_{eq} = \frac{1,14}{T_{max} - 20} \sum_{i=1}^{(T_{max}-20)} (T_{\Delta ti} - 20) \cdot \Delta t_i \quad [\text{hod}] \quad (3.29)$$

3.5.1.5 Ztráta vyvozená okamžitou deformací betonu

Napětí v betonu v okolí předpínací výztuže, pro výpočet napětí použijeme charakteristiky ideálního průřezu:

$$\sigma_{cp} = -\frac{P}{A_I} - \frac{P \cdot e}{I_I} \cdot e_p + \frac{M_{g0}}{I_I} e_p \quad (3.30)$$

Poměrné přetvoření betonu v okolí předpínací výztuže a ztráta pružným přetvořením:

$$\Delta \varepsilon_{cp} = \frac{\sigma_{cp}}{E_c} \quad (3.31)$$

$$\Delta \varepsilon_{cp} = \Delta \varepsilon_p \quad (3.32)$$

$$\Delta \sigma_{el} = \Delta \varepsilon_p \cdot E_p \quad (3.33)$$

3.5.2 Dlouhodobé ztráty

Dlouhodobé změny předpětí se stanovují podle čl. 5.10.6 EN 1992-1-1 [1].

$$\Delta \sigma_{p,c+s+r} = \frac{\varepsilon_{cs}(t, t_0) \cdot E_p + 0,8 \Delta \sigma_{pr} + \frac{E_p}{E_{cm}} \cdot \varphi(t, t_0) \sigma_{c,QP}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}} \frac{A_p}{A_c} \left[\left(1 + \frac{A_c}{I_c} z_{cp}^2 \right) (1 + 0,8 \varphi(t, t_0)) \right]} \quad (3.34)$$

$\varepsilon_{cs}(t, t_0)$	odhadnuté poměrné přetvoření od smršťování podle 3.1.4
E_p	modul pružnosti předpínací výztuže
E_{cm}	modul pružnosti betonu,
$\Delta \sigma_{pr}$	absolutní hodnota změny napětí v předpínacích vložkách v místě x a okamžiku t , vyvozená relaxací předpínací ocele. Je stanovena pro napětí $\sigma_p = \sigma_p(G + P_{m0} + \psi_2 \cdot Q)$, kde $\sigma_p = \sigma_p(G + P_{m0} + \psi_2 \cdot Q)$ je počáteční napětí v předpínacích vložkách vyvozené počátečním předpětím a kvazistálými zatíženími
$\varphi(t, t_0)$	součinitel dotvarování v období od okamžiku začátku působení zatížení t_0 do okamžiku t
$\sigma_{c,QP}$	napětí v betonu, přilehlého k předpínacím vložkám, vyvozené vlastní tíhou a počátečním předpětím a popřípadě dalšími kvazistálými zatíženími. Tlaková napětí a odpovídající přetvoření se zavádí do výpočtu s kladným znaménkem.
A_p	plocha všech předpínacích vložek v místě x
A_c	plocha betonového průřezu
z_{cp}	vzdálenost mezi těžištěm betonového průřezu a předpínacími vložkami

Při výpočtu ztrát smršťováním, dotvarováním a relaxací výztuže vezmeme v potaz různé zatížení a různé vlhkosti pro časová období, daná technologií výstavby / betonáže prefabrikovaného prvku.

3.5.2.1 Smršťování a dotvarování

Pro výpočet smršťování a dotvarování byl použit postup uvedený v příloze B normy ČSN EN 1992-2 [4], který je doporučen pro betony o pevnosti vyšší než C50/60. Postup výpočtu je uveden v příloze [A].

3.5.2.2 Relaxace

Relaxace se stanoví podle EN 1992-1-1 [1], čl.3.3.2. (7). Předpokládají se lana s nízkou relaxací a čas konečné relaxace 500 000 hodin = cca 57 let (doporučení normy).

$$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\Delta\sigma_{pi}} = 0,66 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{9,1 \cdot \mu} \left(\frac{t}{1000} \right)^{0,75(1-\mu)} 10^{-5} \quad (3.35)$$

$$\mu = \frac{\sigma_{Al}}{f_{pk}} \quad (3.36)$$

$\rho_{1000} = 2,5\%$ pro lana s nízkou relaxací

σ_{Al} maximální tahové napětí působící ve výztuži, zmenšené o okamžité ztráty vznikající v průběhu napínání

t doba po napnutí [hod.]

3.6 Mezní stav použitelnosti

Pro mezní stav použitelnosti (Serviceability Limit State = SLS) se používá horní a dolní mez předpínací síly:

$$P_{k,inf} = r_{inf} \cdot P_{m,t} \quad r_{inf} = 0,95$$

$$P_{k,sup} = r_{sup} \cdot P_{m,t} \quad r_{sup} = 1,05$$

Napětí v průřezu se vypočítá podle vzorců (3.10)(3.11), pouze místo momentu od vlastní tíhy se použije moment pro danou kombinaci zatížení. Nosník byl kontrolován v několika řezech a to ve vzdálenosti l_{pt1} , tedy v místě, kde předpínací síla nabývá své maximální hodnoty. V tomto řezu je velikost ohybového momentu minimální, proto lze uvažovat $M_{(x=l_{pt1})} \approx 0$. Dále v řezech, kde se mění hodnota předpínací síly v důsledku separace lan a v místě maximálního momentu, tedy uprostřed rozpětí.

3.6.1 Omezení napětí

Omezení napětí v tlačeném betonu:

$$\sigma_c < k_1 \cdot f_{ck} = 0,6 \cdot f_{ck} \quad (3.37)$$

pro charakteristickou kombinaci zatížení a prostředí XD, XF, XS nesmí tlakové napětí v betonu překročit tuto mez, pokud by napětí tuto mez překročilo mohlo by dojít ke vzniku podélných trhlin.

$$\sigma_c < k_2 \cdot f_{ck} < 0,45 \cdot f_{ck} \quad (3.38)$$

pro kvazi stálou kombinaci zatížení a zajištění linearitu dotvarování. Pokud by tato hranice byla překročena muselo by se přistoupit k nelineárnímu výpočtu dotvarování.

Omezení napětí v předpínací výztuži:

$$\sigma_p < k_5 \cdot f_{pk} < 0,75 \cdot f_{pk} \quad (3.39)$$

pro charakteristickou kombinaci zatížení.

3.6.2 Omezení trhlin

Moment na mezi vzniku trhlin:

V předpjatém průřezu se zpravidla snažíme omezit vznik trhlin, tedy napětí v betonu nesmí překročit pevnost betonu v tahu.

$$-\frac{P}{A_l} - \frac{P \cdot e_p}{I_l} \cdot a_{gld} + \frac{M}{I_l} \cdot a_{gld} \leq f_{ctm} \quad (3.40)$$

Dekomprese:

Při dekompresi se požaduje, aby veškerá soudržná předpínací výztuž nebo hadice byly alespoň 25 mm uvnitř tlačného betonu.

Pro mosty dle ČSN EN 1992-2 [4] se požaduje, aby předpínací výztuž byla alespoň 100 mm uvnitř tlačného betonu.

3.6.3 Přetvoření

Mezní hodnoty průhybů:

Z hlediska vzhledu a obecné použitelnosti (pro kvazistálou kombinaci zatížení):

$$f_{lim} = \frac{L}{250}$$

Z hlediska navazujících konstrukcí (pro kvazistálou kombinaci zatížení, *po zabudování prvku*)

$$f_{lim,2} = \frac{L}{500}$$

3.7 Mezní stav únosnosti

Návrhová hodnota předpínací síly pro mezní stav únosnosti (Ultimate Limit State = ULS):

P_m - průměrná hodnota

3.7.1 Únosnost v ohybu-Metoda mezní rovnováhy

Na mezi únosnosti se předpokládá mezní napětí v betonu i ve výztuži, pro síly v průřezu platí podmínka rovnováhy sil.

Podmínky rovnováhy sil (zjednodušeně):

$$\rightarrow x: P_{\infty} + \Delta F_p - F_c = 0 \quad (3.41)$$

$$\sum M: M_{Rd} = P_{\infty} \cdot e_p + F_c \cdot z_c + \Delta F_p \cdot z_p \quad (3.42)$$

$$P_{\infty} = A_p \cdot \sigma_{\infty} \quad (3.43)$$

$$F_c = A_p \cdot \Delta \sigma_p \quad (3.44)$$

$$\Delta F_p = A_p \cdot \Delta \sigma_p \quad (3.45)$$

$$x = \frac{F_c}{\lambda \eta b f_{cd,ULS}} \quad (3.46)$$

$$\eta \quad \eta = 1,0 \text{ pro beton } f_{ck} < 50 \text{ MPa}$$

$$\eta = 1 - \frac{f_{ck}-50}{200} \text{ pro beton } f_{ck} > 50 \text{ MPa}$$

$$\lambda \quad \lambda = 0,8 \text{ pro beton } f_{ck} < 50 \text{ MPa}$$

$$\lambda = 0,8 - \frac{f_{ck}-50}{400} \text{ pro beton } f_{ck} > 50 \text{ MPa}$$

$$x < x_{\lim}$$

$$x_{\lim} = \frac{|\varepsilon_{cu}|}{|\varepsilon_{cu}| + \Delta \varepsilon_{pe}} \cdot d, \text{ kde } \Delta \varepsilon_{pe} = \frac{\Delta \sigma_p}{E_p} \quad (3.47)$$

3.7.2 Únosnost ve smyku

Únosnost prvku ve smyku se posuzuje ve vzdálenosti l_{pt2} .

Únosnost prvku ve smyku se smykovou výztuží:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cotg \theta \quad (3.48)$$

Maximální únosnost prvku ve smyku:

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot \frac{f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} \quad (3.49)$$

$$\alpha_{cw} \quad \alpha_{cw} = 1,0 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} \text{ pro } 0 < \sigma_{cp} \leq 0,25 f_{cd}$$

$$\alpha_{cw} = 1,25 \text{ pro } 0,25 f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 0,5 f_{cd}$$

$$\alpha_{cw} = 2,5 \left(1 - \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}\right) \text{ pro } 0,5 f_{cd} < \sigma_{cp} \leq f_{cd}$$

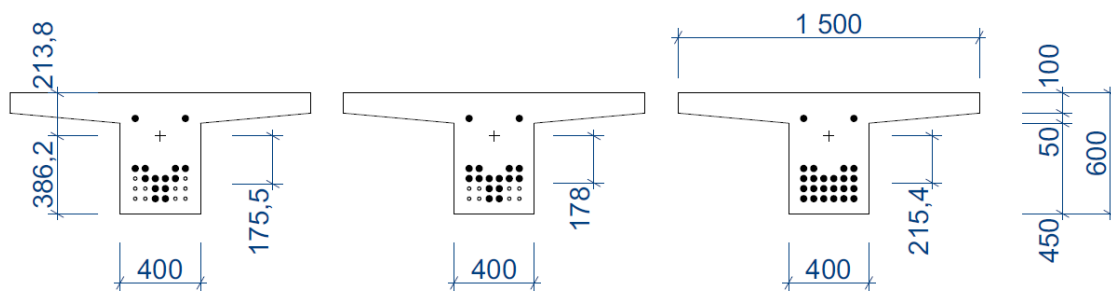
$$v_1 \quad v_1 = 0,6 \text{ pro beton } f_{ck} < 60 \text{ MPa}$$

$$v_1 = 0,9 - \frac{f_{ck}}{200} > 0,5 \text{ pro beton } f_{ck} \geq 60 \text{ MPa}$$

4 Návrh a posouzení nosníků L=15 m

Pro rozpětí 15 metrů byl navržen nosník výšky 600 mm. Šířka nosníku je 400 mm. Šířka horní příruby je 1500 mm. V pozdějších stadiích bude nosník spřažen s monolitickou deskou tloušťky 250 mm.

Pro rozpětí 15 m bylo navrženo 24 předem předpjatých lan. Z toho 22 u dolního okraje a dvě u horního okraje nosníku. Lana jsou separována dle následujícího obrázku. Separace je provedena symetricky z obou stran. Můžeme vidět 3 řezy nosníkem. První pro začátek nosníku, tj. do vzdálenosti $x=2$ m. V této vzdálenosti působí 14 lan. Druhý řez je pro vzdálenost 2 až 4 metry. V tomto řezu působí 16 lan. V posledním řezu pro vzdálenost 4 až 11 metrů působí všechna lana. Pro výpočet byla skupina lan nahrazena jedním lanem v těžišti předpínací výztuže. Na obrázku vidíme vzdálenost těžiště betonu od vzdálenosti těžiště předpínací výztuže. Lana jsou umístěna i separována symetricky.



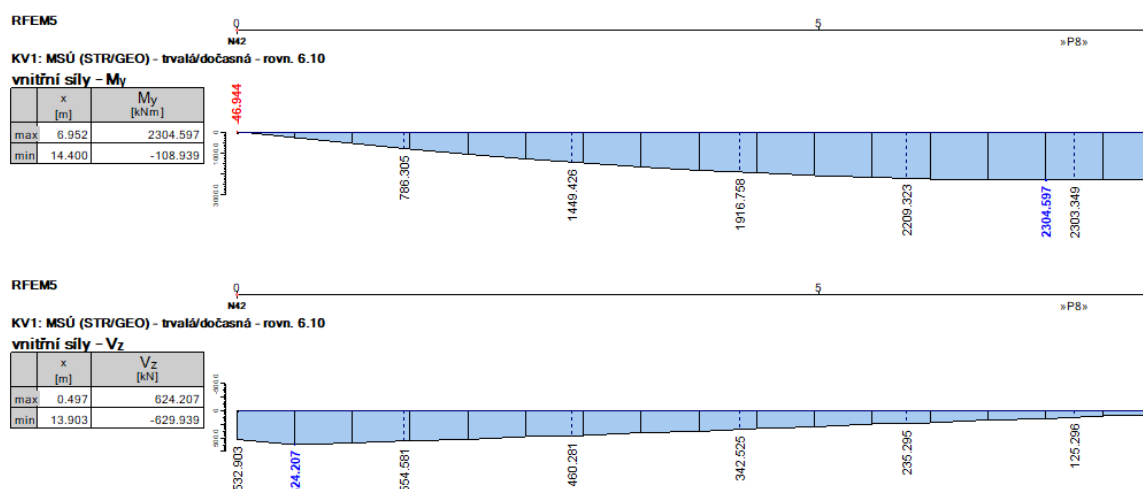
Obr. 4.1 - Schéma vyztužení nosníků pro L=15 m

4.1 Beton C55/67

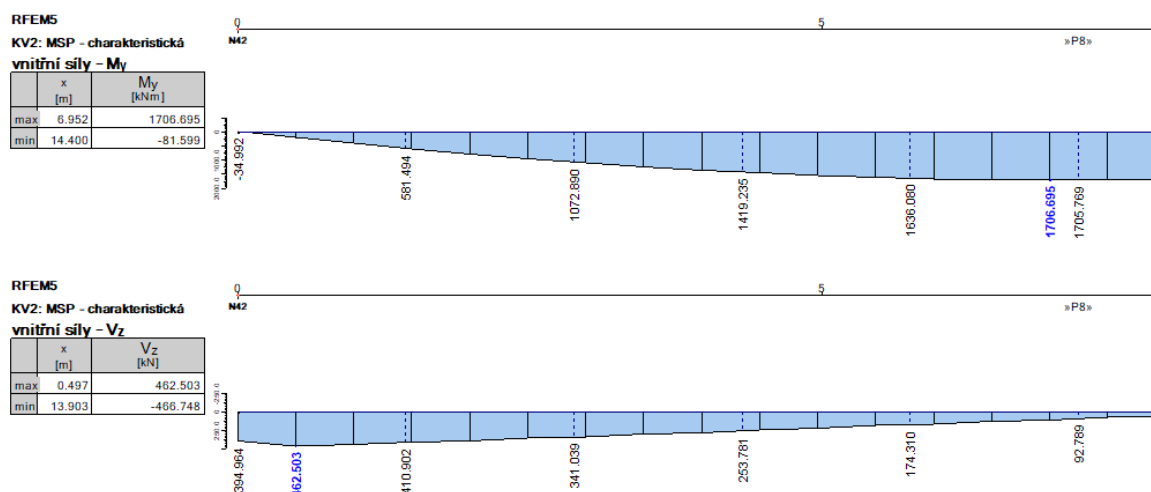
Postup výpočtu byl proveden dle kapitoly 3. Kvůli velkému množství výpočtů budou výsledky zobrazeny v názorných tabulkách. Pro výpočet byly uvažovány materiálové charakteristiky dle Tab. 3.1, Tab. 3.2 a Tab. 3.4.

4.1.1 Vnitřní síly

Jelikož se jedná o prostý nosník a výsledky jsou téměř symetrické, vnitřní síly jsou zobrazeny pro $\frac{1}{2}$ rozpětí pro lepší čitelnost. Výsledky jsou zobrazeny pro nejvíce namáhaný nosník.



Obr. 4.2 - MSÚ-rovnice 6.10 L15, C55/67



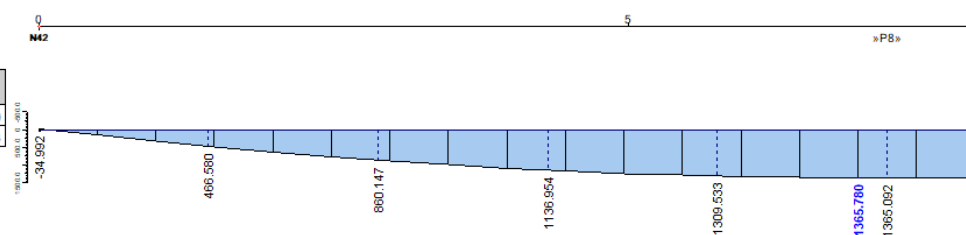
Obr. 4.3 - MSP-charakteristická kombinace L15, C55/67

RFEM5

KV3: MSP - částá

vnitřní síly - M_y

	x [m]	M_y [kNm]
max	6.952	1365.780
min	14.400	-65.564

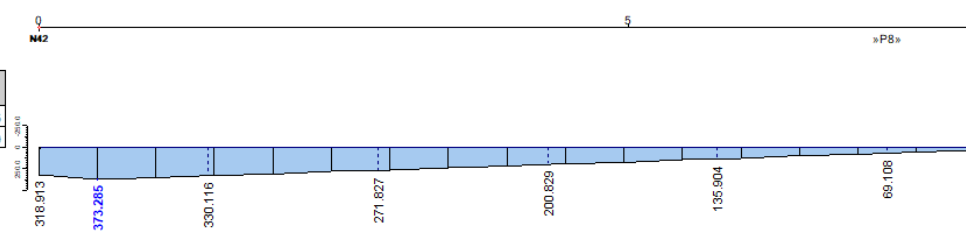


RFEM5

KV3: MSP - částá

vnitřní síly - V_z

	x [m]	V_z [kN]
max	0.497	373.285
min	13.903	-376.839



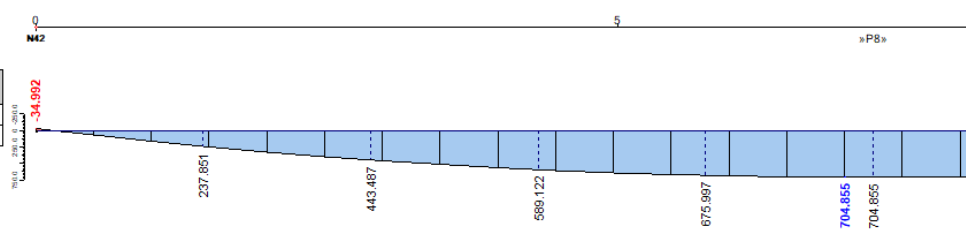
Obr. 4.4 - MSP-částá kombinace L15, C55/67

RFEM5

KV4: MSP - kvazistálá

vnitřní síly - M_y

	x [m]	M_y [kNm]
max	6.952	704.855
min	0.000	-34.992

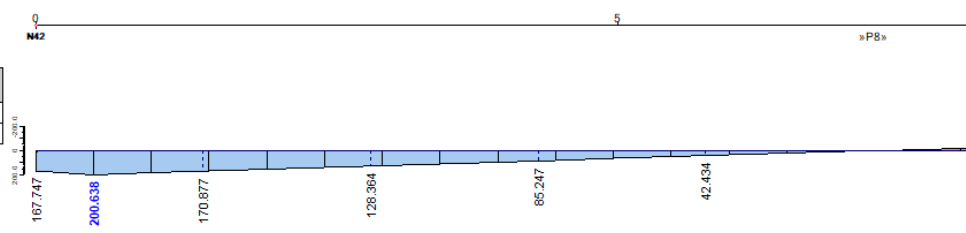


RFEM5

KV4: MSP - kvazistálá

vnitřní síly - V_z

	x [m]	V_z [kN]
max	0.497	200.638
min	13.903	-200.638



Obr. 4.5 - MSP-kvazistálá kombinace L15, C55/67

4.1.2 Ideální průřez

Výpočet ideálního průřezu byl proveden dle vzorců (3.12) až (3.19). V horní polovině tabulky se nachází výpočet pro nosník samostatný. V dolní polovině pro nosník společně s deskou.

Tab. 4.1 - Výpočet ideálního průřezu L15, C55/67

Vzdálenost [mm]:			lpt1+a	lpt1+2m+a	lpt1+4m+a	l/2
			1007,19	3007,19	5007,19	7500
Počet prutů předpínací výztuže			14	16	24	24
Ideální průřez - T průřez	Ac	[mm ²]	377500,00	377500,00	377500,00	377500,00
	Ecm	[Mpa]	38000,00	38000,00	38000,00	38000,00
	agcd	[mm]	386,20	386,20	386,20	386,20
	Ic	[mm ⁴]	1,20E+10	1,20E+10	1,20E+10	1,20E+10
	Ap [mm ²]	[mm ²]	2100,00	2400,00	3600,00	3600,00
	Ep	[Mpa]	195000,00	195000,00	195000,00	195000,00
	ep	[mm]	175,49	179,95	215,37	215,37
	Ip	[mm ⁴]	41753,85	47718,69	71578,03	71578,03
	αE	[-]	5,13	5,13	5,13	5,13
	Ai	[mm ²]	388276,32	389815,79	395973,68	395973,68
	ti	[mm]	4,87	5,69	10,05	10,05
	agid	[mm]	381,33	380,51	376,15	376,15
	agih	[mm]	218,67	219,49	223,85	223,85
	Ii	[mm ⁴]	1,23E+10	1,24E+10	1,28E+10	1,28E+10
	ei	[mm]	170,62	174,26	205,32	205,32
Ideální průřez - T průřez společně s deskou	Ac		752500,00	752500,00	752500,00	752500,00
	agcd		555,04	555,04	555,04	555,04
	Ec		35508,31	35508,31	35508,31	35508,31
	Ic		3,55E+10	3,55E+10	3,55E+10	3,55E+10
	Ap [mm ²]	[mm ²]	2100,00	2400,00	3600,00	3600,00
	Ep	[Mpa]	195000,00	195000,00	195000,00	195000,00
	ep	[mm]	344,32	348,79	384,20	384,20
	Ip	[mm ⁴]	41753,85	47718,69	71578,03	71578,03
	αE	[-]	5,49	5,49	5,49	5,49
	Ai	[mm ²]	764032,51	765680,01	772270,02	772270,02
	ti	[mm]	5,20	6,00	9,84	9,84
	agid	[mm]	549,84	549,03	545,20	545,20
	agih	[mm]	300,16	300,97	304,80	304,80
	Ii	[mm ⁴]	3,69E+10	3,71E+10	3,84E+10	3,84E+10
	ei	[mm]	339,13	342,78	374,37	374,37

4.1.3 Kotvení předem předpjaté výztuže

Výpočet délky kotvení předem předpjaté výztuže byl proveden dle vzorců (3.20) až (3.22).

Tab. 4.2 - Výpočet délky kotvení předem předpjaté výztuže L15, C55/67

Délka přenosu síly l_{pt}	η_{p1}	[-]	3,20
	η_1	[-]	1,00
	$f_{ctm}(1den)$	[MPa]	3,15
	α_{ct}		1,00
	$f_{ctd}(1den)$	[MPa]	1,47
	f_{bpt}	[MPa]	4,70
	α_1	[-]	1,00
	α_2	[-]	0,19
	ϕ	[mm]	15,70
	σ_{pm0}	[MPa]	1394,00
	l_{pt}	[mm]	883,99
	l_{pt1}	[mm]	707,19
	l_{pt2}	[mm]	1060,79
	l_{dis}	[mm]	982,66

4.1.4 Ztráty předpětí

Výpočet ztrát předpětí byl proveden dle vzorců (3.23) až (3.36). Výpočet dotvarování a smršťování viz příloha A1.

Tab. 4.3 - Výpočet krátkodobých ztrát L15, C55/67

Krátkodobé ztráty		
$\sigma_{p,max}$	[Mpa]	1488
$A_{p,1}$	[mm ²]	150
Ztráta pokluzem v kotvě		
w	[mm]	4,00
L	[m]	15,00
$\Delta\sigma_w$	[MPa]	52,00
Ztráta deformací výrobní dráhy		
w	[mm]	4,00
L	[m]	15,00
$\Delta\sigma_w$	[MPa]	52,00
Ztráta relaxací výztuže před vnesením předpětí		
Třída rel. Chování		2,00
$\sigma_{p,a}$	[MPa]	1384,00
ρ_{1000}	[%]	2,50
μ	[-]	0,74
Tmax	[°C]	40,00
Δt	[hod]	12,00
teq	[hod]	164,92
t1	[hod]	48,00
t	[hod]	200,92
$\Delta\sigma_{pr}$	[MPa]	14,64
Ztráta při tepelném ošetřování		
α_c	[1/K]	1,00E-05
Tmax	[°C]	40,00
T0	[°C]	20,00
$\Delta\sigma_\theta$	[MPa]	19,50
Ztráta okamžitou deformací betonu		
σ_p	[Mpa]	1349,86
P	[kN]	4859,50
σ_{cp}	[MPa]	-26,70
$\Delta\epsilon_{cp}$	[-]	0,00
$\Delta\sigma_{el}$	[MPa]	137,02
$\sigma_{p,a}$	[MPa]	1212,84
Relaxace		
$\sigma_{p,a}$	[MPa]	1384,00
ρ_{1000}	[%]	2,50
μ	[-]	0,74
t	[hod]	500000,00
$\Delta\sigma_{pr,57}$	[MPa]	65,67
$\Delta\sigma_{pr,28}$	[MPa]	18,46

Tab. 4.4 - Výpočet dlouhodobých ztrát L15, C55/67

Dlouhodobé ztráty			
Čas		28dní	100let
ϵ_{cs}	[-]	9,60E-05	6,43E-04
$\Delta\sigma_{pr}$	[MPa]	18,46	65,67
$\varphi(t,t_0)$		0,598	1,439
z_{cp}		215,37	215,37
σ_{cp}	[MPa]	-17,52	-14,10
$\Delta\sigma_p$	[MPa]	74,07	224,01
σ_p	[MPa]	1138,77	988,83
ρ		4099,56	3559,78
Rekapitulace napětí			Předpokládané napětí
$\sigma_{p,a}$	[MPa]	1212,84	1264,8
$\sigma_{p,28}$	[MPa]	1138,77	-
$\sigma_{p,\infty}$	[MPa]	988,83	1075,08

4.1.5 Mezní stav použitelnosti

V následující tabulce můžeme vidět posudky pro mezní stav použitelnosti. Nosník byl posouzen ve 3 časových intervalech. V době zavedení předpětí, kdy nosník působí samostatně. V tomto čase na nosník působí maximální předpínací síla a nosník je nejméně zatížen. Druhý časový interval byl uvažován v čase 28 dní při betonáži železobetonové desky (mostovky). Nosník působí samostatně. Zatížení uvažováno jako 1,2násobek vlastní tíhy desky a nosníku. Tímto bylo zohledněno montážní zatížení a tíha čerstvého betonu. Poslední časový interval na konci životnosti (100 let). Nosník působí společně s deskou. Uvažována kvazistálá, častá a charakteristická kombinace zatížení.

Posudky byly provedeny dle vzorců (3.30) až (3.37). Napětí v průřezu se vypočítá podle vzorců (3.10) a (3.11).

Tab. 4.5 - Posouzení nosníku – SLS L15, C55/67

Vzdálenost [mm]:		lpt1+a	lpt1+2m+a	lpt1+4m+a	l/2
		1007,19	3007,19	5007,19	7500
Počet prutů předpínací výztuže		14	16	24	24
Napětí v průřezu po uvolnění předpínací výztuže					
	rsup	1,05			
	Pa	[kN]	2546,96	2910,81	4366,22
	Mg0	[kNm]	69,16	176,99	245,55
	σd	[MPa]	-21,01	-17,61	-30,30
	σh	[MPa]	1,21	-1,61	0,17
	Podmínka:	$ \sigma \leq \{0,7f_{ck}; f_{ctm}\}$		38,50	4,20
					Vyhoví
Napětí v průřezu při betonáži desky					
	rsup	1,05			
	P,28	[kN]	2391,41	2733,04	4099,56
	1,2*Mg1	[kNm]	102,72	353,28	515,88
	σd	[MPa]	-16,55	-11,87	-21,67
	σh	[MPa]	-0,69	-4,76	-4,45
	Podmínka:	$ \sigma \leq \{0,45f_{ck}; f_{ctm}\}$		24,75	4,20
					Vyhoví
Napětí v průřezu kvazistálá kombinace					
	rinf	0,95			
	P,∞	[kN]	2076,54	2373,19	3559,78
	Mg1	[kNm]	85,60	294,40	429,90
	Mkv	[kNm]	105,30	420,80	617,60
	σd	[MPa]	-12,55	-6,94	-13,64
	σh	[MPa]	-0,65	-4,21	-4,19
	σh'	[MPa]	-0,03	-0,17	-0,27
	σh2	[MPa]	-0,16	-1,02	-1,49
	Podmínka:	$ \sigma \leq \{0,45f_{ck}; f_{ctm}\}$		24,75	13,50
					Vyhoví
Napětí v průřezu častá kombinace					
	rinf	0,95			
	P,∞	[kN]	2076,54	2373,19	3559,78
	Mg1	[kNm]	85,60	294,40	429,90
	Mč	[kNm]	215,80	815,90	1194,60
	σd	[MPa]	-10,91	-1,10	-5,44
	σh	[MPa]	-0,80	-4,75	-5,01
	σh'	[MPa]	-0,18	-0,72	-1,09
	σh2	[MPa]	-1,06	-4,23	-6,07
	Podmínka:	Dekomprese Výztuž v tlačené oblasti x>100		367,91	Vyhoví
Napětí v průřezu charakteristická kombinace					
	rinf	0,95			
	P,∞	[kN]	2076,54	2373,19	3559,78
	Mg1	[kNm]	85,60	294,40	429,90
	Mch	[kNm]	269,70	1017,50	1491,70
	σd	[MPa]	-10,10	1,89	-1,22
	σh	[MPa]	-0,88	-5,03	-5,44
	σh'	[MPa]	-0,25	-0,99	-1,52
	σh2	[MPa]	-1,50	-5,86	-8,43
	Podmínka:	$ \sigma \leq \{0,6f_{ck}; f_{ctm}\}$		33,00	18,00
					4,20
					Vyhoví
Napětí v předpínací výztuži					
			σp	<	0,75 fpk
	σp,a	[Mpa]	1212,84	<	1395
	σp,28	[Mpa]	1138,77	<	1395
	σp,∞	[Mpa]	988,83	<	1395
					Vyhoví

4.1.6 Mezní stav únosnosti

Posudky na mezní stav únosnosti byly provedeny dle vzorců (3.41) až (3.49).

Tab. 4.6 - Posudek na ohyb L15, C55/67

Metoda mezní rovnováhy	fcd	[MPa]	17,00
	ϵ_{cu3}	[-]	0,0035
	fpd	[MPa]	1426,09
	Ep	[MPa]	195000,00
	Ap	[mm ²]	3600,00
	$\Delta\sigma_p$	[MPa]	213,25
	ΔF_p	[kN]	767,69
	P	[kN]	4366,22
	Fc	[kN]	5133,91
	d	[mm]	679,17
	b	[mm]	1500,00
	η	[-]	0,98
	λ	[-]	0,79
	x	[mm]	262,21
	ξ_{bal}	[-]	0,76
	x _{lim}	[mm]	517,48
	z _p	[mm]	384,20
	z _c	[mm]	190,08
	M _{rd}	[kNm]	2948,31
	M _{ed}	[kNm]	2304,6
	M _{rd} >M _{ed}		Vyhoví

Tab. 4.7 - Posudek na smyk L15, C55/67

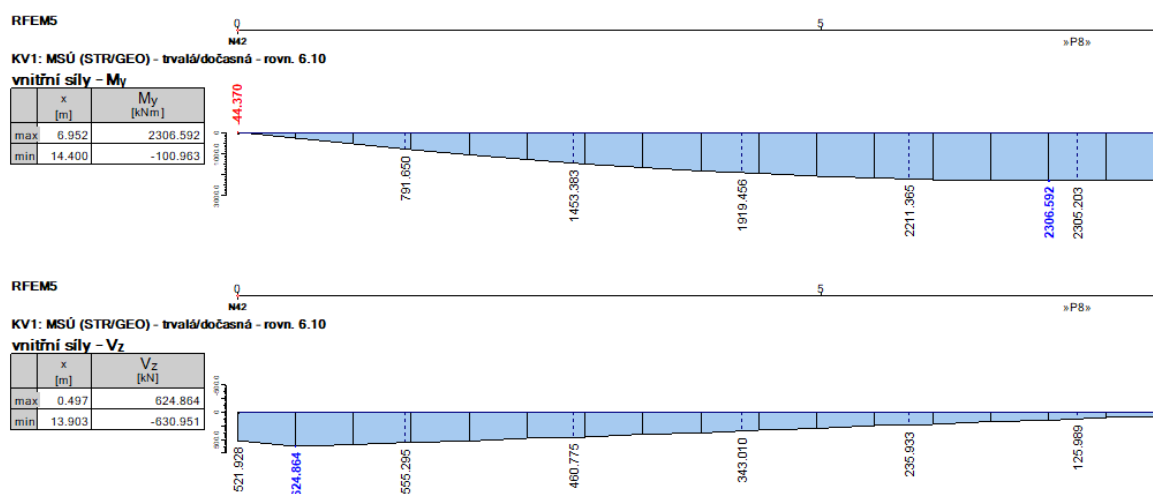
Únosnost ve smyku se smykovou výztuží	ϕ_{sw}	[mm]	14,00
	N _{sw}	[-]	2,00
	A _{sw}	[mm ²]	307,88
	s	[mm]	100,00
	z	[mm]	611,25
	f _{ywd}	[MPa]	434,78
	θ	[°]	45,00
	V _{rd,s}	[kN]	818,21
	σ_{cp}	[MPa]	11,57
	α_{cw}	[-]	1,25
	v _{1>0,5}	[-]	0,60
	v ₁	[-]	0,60
	b _w	[mm]	400,00
	V _{rd,max}	[kN]	2857,59
	V _{ed,(x=l_{pt2})}	[kN]	603,4
	V _{rd} >V _{ed}		Vyhoví

4.2 Beton C90/105

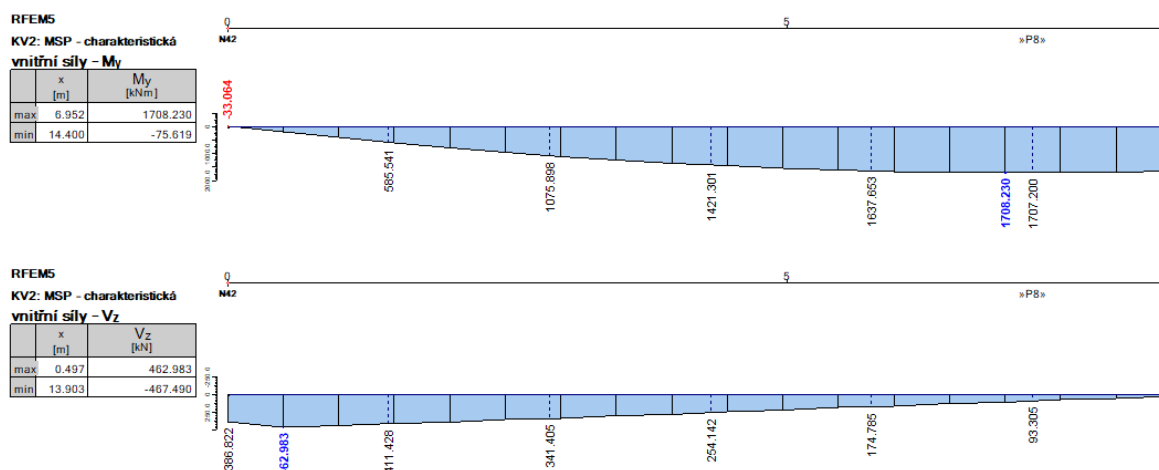
Postup výpočtu byl proveden dle kapitoly 3. Kvůli velkému množství výpočtů budou výsledky zobrazeny v názorných tabulkách. Pro výpočet byly uvažovány materiálové charakteristiky dle Tab. 3.1, Tab. 3.3 a Tab. 3.4.

4.2.1 Vnitřní síly

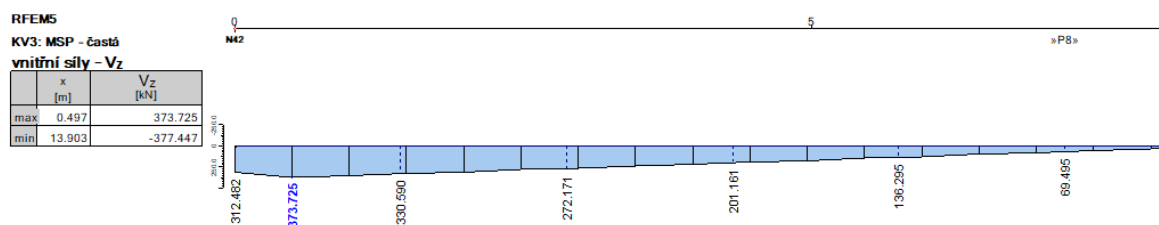
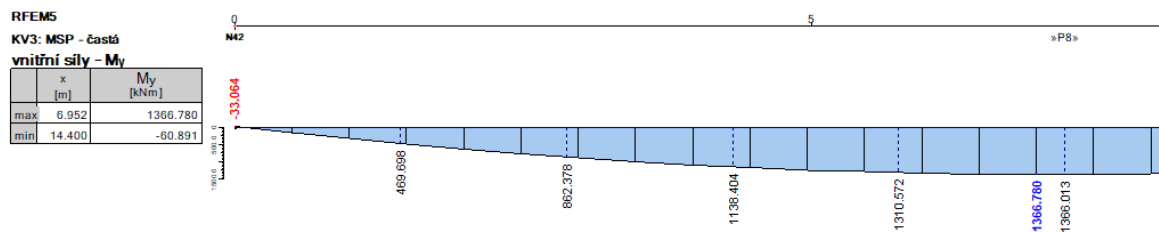
Jelikož se jedná o prostý nosník a výsledky jsou téměř symetrické, vnitřní síly jsou zobrazeny pro $\frac{1}{2}$ rozpětí pro lepší čitelnost. Výsledky jsou zobrazeny pro nejvíce namáhaný nosník.



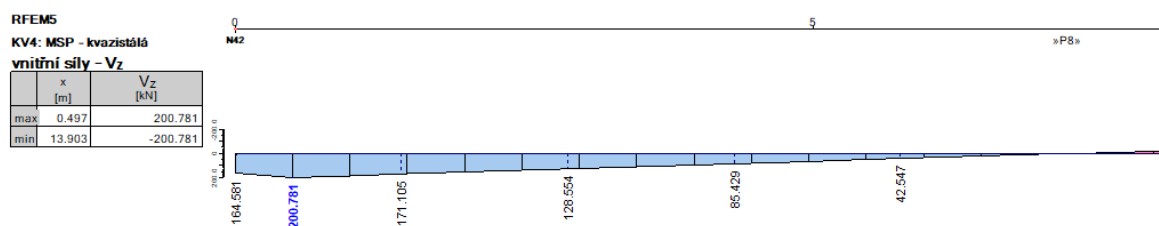
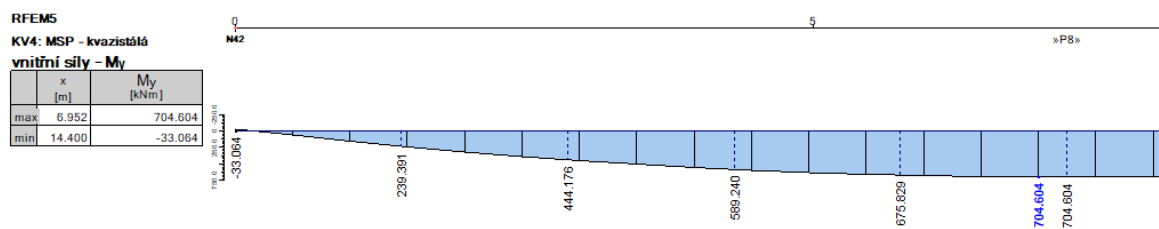
Obr. 4.6 - MSÚ-rovnice 6.10 L15, C90/105



Obr. 4.7 - MSP-charakteristická kombinace L15, C90/105



Obr. 4.8 - MSP-častá kombinace L15, C90/105



Obr. 4.9 - MSP-kvazistálá kombinace L15, C90/105

4.2.2 Ideální průřez

Výpočet ideálního průřezu byl proveden dle vzorců (3.12) až (3.19). V horní polovině tabulky se nachází výpočet pro nosník samostatný. V dolní polovině pro nosník společně s deskou.

Tab. 4.8 - Výpočet ideálního průřezu L15, C90/105

Vzdálenost [mm]:			lpt1+a	lpt1+2m+a	lpt1+4m+a	l/2
			894,04	2894,04	4894,04	7500
Počet prutů předpínací výztuže			14	16	24	24
Ideální průřez - T průřez	Ac	[mm ²]	377500,00	377500,00	377500,00	377500,00
	Ecm	[Mpa]	44000,00	44000,00	44000,00	44000,00
	agcd	[mm]	386,20	386,20	386,20	386,20
	Ic	[mm ⁴]	1,20E+10	1,20E+10	1,20E+10	1,20E+10
	Ap [mm ²]	[mm ²]	2100,00	2400,00	3600,00	3600,00
	Ep	[Mpa]	195000,00	195000,00	195000,00	195000,00
	ep	[mm]	175,49	186,20	215,37	215,37
	Ip	[mm ⁴]	41753,85	47718,69	71578,03	71578,03
	αE	[-]	4,43	4,43	4,43	4,43
	Ai	[mm ²]	386806,82	388136,36	393454,55	393454,55
	ti	[mm]	4,22	5,10	8,73	8,73
	agid	[mm]	381,98	381,10	377,47	377,47
	agih	[mm]	218,02	218,90	222,53	222,53
	Ii	[mm ⁴]	1,23E+10	1,24E+10	1,27E+10	1,27E+10
	ei	[mm]	171,26	181,10	206,63	206,63
Ideální průřez - T průřez společně s deskou	Ac		752500,00	752500,00	752500,00	752500,00
	agcd		555,04	555,04	555,04	555,04
	Ec		38518,27	38518,27	38518,27	38518,27
	Ic		3,55E+10	3,55E+10	3,55E+10	3,55E+10
	Ap [mm ²]	[mm ²]	2100,00	2400,00	3600,00	3600,00
	Ep	[Mpa]	195000,00	195000,00	195000,00	195000,00
	ep	[mm]	344,32	355,04	384,20	384,20
	Ip	[mm ⁴]	41753,85	47718,69	71578,03	71578,03
	αE	[-]	5,06	5,06	5,06	5,06
	Ai	[mm ²]	763131,32	764650,08	770725,12	770725,12
	ti	[mm]	4,80	5,64	9,09	9,09
	agid	[mm]	550,24	549,40	545,95	545,95
	agih	[mm]	299,76	300,60	304,05	304,05
	Ii	[mm ⁴]	3,68E+10	3,71E+10	3,82E+10	3,82E+10
	ei	[mm]	339,53	349,40	375,12	375,12

4.2.3 Kotvení předem předpjaté výztuže

Výpočet délky kotvení předem předpjaté výztuže byl proveden dle vzorců (3.20) až (3.22).

Tab. 4.9 - Výpočet délky kotvení předem předpjaté výztuže L15, C90/105

Délka přenosu síly l_{pt}	η_{p1}	[-]	3,20
	η_1	[-]	1,00
	$f_{ctm}(1den)$	[MPa]	3,75
	α_{ct}		1,00
	$f_{ctd}(1den)$	[MPa]	1,75
	f_{bpt}	[MPa]	5,60
	α_1	[-]	1,00
	α_2	[-]	0,19
	ϕ	[mm]	15,70
	σ_{pm0}	[MPa]	1394,00
	l_{pt}	[mm]	742,55
	l_{pt1}	[mm]	594,04
	l_{pt2}	[mm]	891,06
	l_{dis}	[mm]	857,65

4.2.4 Ztráty předpětí

Výpočet ztrát předpětí byl proveden dle vzorců (3.23) až (3.36). Výpočet dotvarování a smršťování viz příloha A2.

Tab. 4.10 - Výpočet krátkodobých ztrát L15, C90/105

Krátkodobé ztráty		
$\sigma_{p,max}$	[Mpa]	1488
$A_{p,1}$	[mm ²]	150
Ztráta pokluzem v kotvě		
w	[mm]	4,00
L	[m]	15,00
$\Delta\sigma_w$	[MPa]	52,00
Ztráta deformací výrobní dráhy		
w	[mm]	4,00
L	[m]	15,00
$\Delta\sigma_w$	[MPa]	52,00
Ztráta relaxací výztuže před vnesením předpětí		
Třída rel. Chování		2,00
$\sigma_{p,a}$	[MPa]	1384,00
ρ_{1000}	[%]	2,50
μ	[-]	0,74
T _{max}	[°C]	40,00
Δt	[hod]	12,00
t _{eq}	[hod]	164,92
t ₁	[hod]	48,00
t	[hod]	200,92
$\Delta\sigma_{pr}$	[MPa]	14,64
Ztráta při tepelném ošetřování		
α_c	[1/K]	1,00E-05
T _{max}	[°C]	40,00
T ₀	[°C]	20,00
$\Delta\sigma_{\theta}$	[MPa]	19,50
Ztráta okamžitou deformací betonu		
σ_p	[Mpa]	1349,86
P	[kN]	4859,50
σ_{cp}	[MPa]	-26,70
$\Delta\epsilon_{cp}$	[-]	0,00
$\Delta\sigma_{el}$	[MPa]	118,34
$\sigma_{p,a}$	[MPa]	1231,52
Relaxace		
$\sigma_{p,a}$	[MPa]	1384,00
ρ_{1000}	[%]	2,50
μ	[-]	0,74
t	[hod]	500000,00
$\Delta\sigma_{pr,57}$	[MPa]	65,67
$\Delta\sigma_{pr,28}$	[MPa]	18,46

Tab. 4.11 - Výpočet dlouhodobých ztrát L15, C90/105

Dlouhodobé ztráty			
Čas		28dní	100let
ϵ_{cs}	[-]	1,53E-04	4,82E-04
$\Delta\sigma_{pr}$	[MPa]	18,46	65,67
$\varphi(t,t_0)$		0,518	1,046
z_{cp}		215,37	215,37
σ_{cp}	[MPa]	-18,18	-14,70
$\Delta\sigma_p$	[MPa]	75,27	180,26
σ_p	[MPa]	1156,26	1051,26
P		4162,52	3784,54
Rekapitulace napětí			Předpokládané napětí
$\sigma_{p,a}$	[MPa]	1231,52	1264,8
$\sigma_{p,28}$	[MPa]	1156,26	-
$\sigma_{p,\infty}$	[MPa]	1051,26	1075,08

4.2.5 Mezní stav použitelnosti

V následující tabulce můžeme vidět posudky pro mezní stav použitelnosti. Nosník byl posouzen ve 3 časových intervalech. V době zavedení předpětí, kdy nosník působí samostatně. V tomto čase na nosník působí maximální předpínací síla a nosník je nejméně zatížen. Druhý časový interval byl uvažován v čase 28 dní při betonáži železobetonové desky (mostovky). Nosník působí samostatně. Zatížení uvažováno jako 1,2násobek vlastní tíhy desky a nosníku. Tímto bylo zohledněno montážní zatížení a tíha čerstvého betonu. Poslední časový interval na konci životnosti (100 let). Nosník působí společně s deskou. Uvažována kvazistálá, častá a charakteristická kombinace zatížení.

Posudky byly provedeny dle vzorců (3.30) až (3.37). Napětí v průřezu se vypočítá podle vzorců (3.10) a (3.11).

Tab. 4.12 – Posouzení nosníku-SLS L15, C90/105

Vzdálenost [mm]:		lpt1+a	lpt1+2m+a	lpt1+4m +a	l/2
		894,04	2894,04	4894,04	7500
Počet prutů předpínací výztuže		14	16	24	24
Napětí v průřezu po uvolnění předpínací výztuže					
rsup	1,05				
Pa	[kN]	2586,20	2955,66	4433,48	4433,48
Mg0	[kNm]	61,89	171,94	242,72	276,05
σd	[MPa]	-21,49	-18,82	-31,42	-30,28
σh	[MPa]	1,24	-1,18	0,37	-0,06
Podmínka:		$ \sigma \leq \{0,7f_{ck}; f_{ctm}\}$		63,00	5,00
					Vyhoví
Napětí v průřezu při betonáži desky					
rsup	1,05				
P,28	[kN]	2428,14	2775,02	4162,52	4162,52
1,2*Mg1	[kNm]	102,72	353,28	515,88	589,32
σd	[MPa]	-16,98	-12,88	-22,61	-20,43
σh	[MPa]	-0,66	-4,42	-4,33	-5,61
Podmínka:		$ \sigma \leq \{0,45f_{ck}; f_{ctm}\}$		40,50	5,00
					Vyhoví
Napětí v průřezu kvazistálá kombinace					
rinf	0,95				
P,∞	[kN]	2207,65	2523,03	3784,54	3784,54
Mg1	[kNm]	85,60	294,40	429,90	491,10
Mkv	[kNm]	105,30	420,80	617,60	704,90
σd	[MPa]	-13,64	-8,61	-15,75	-13,56
σh	[MPa]	-0,59	-3,87	-3,92	-5,03
σh´	[MPa]	-0,03	-0,17	-0,27	-0,30
σh2	[MPa]	-0,16	-1,03	-1,49	-1,70
Podmínka:		$ \sigma \leq \{0,45f_{ck}; f_{ctm}\}$		40,50	13,50
					Vyhoví
Napětí v průřezu častá kombinace					
rinf	0,95				
P,∞	[kN]	2207,65	2523,03	3784,54	3784,54
Mg1	[kNm]	85,60	294,40	429,90	491,10
Mč	[kNm]	215,80	815,90	1194,60	1365,80
σd	[MPa]	-11,98	-2,75	-7,50	-4,11
σh	[MPa]	-0,74	-4,41	-4,74	-5,97
σh´	[MPa]	-0,18	-0,71	-1,08	-1,24
σh2	[MPa]	-1,06	-4,23	-6,09	-6,97
Podmínka:		Dekomprese Výztuž v tlačené oblasti x>100		1390,95	Vyhoví
Napětí v průřezu charakteristická kombinace					
rinf	0,95				
P,∞	[kN]	2207,65	2523,03	3784,54	3784,54
Mg1	[kNm]	85,60	294,40	429,90	491,10
Mch	[kNm]	269,70	1017,50	1491,70	1706,70
σd	[MPa]	-11,18	0,24	-3,25	0,77
σh	[MPa]	-0,81	-4,69	-5,16	-6,45
σh´	[MPa]	-0,25	-0,99	-1,50	-1,72
σh2	[MPa]	-1,50	-5,87	-8,46	-9,68
Podmínka:		$ \sigma \leq \{0,6f_{ck}; f_{ctm}\}$		54,00	18,00
					5,00
					Vyhoví
Napětí v předpínací výztuži					
		σp	<	0,75 fpk	
σp,a	[Mpa]	1231,52	<	1395	Vyhoví
σp,28	[Mpa]	1156,26	<	1395	Vyhoví
σp,∞	[Mpa]	1051,26	<	1395	Vyhoví

4.2.6 Mezní stav únosnosti

Posudky na mezní stav únosnosti byly provedeny dle vzorců (3.41) až (3.49).

Tab. 4.13 - Posouzení nosníku na ohyb L15, C90/105

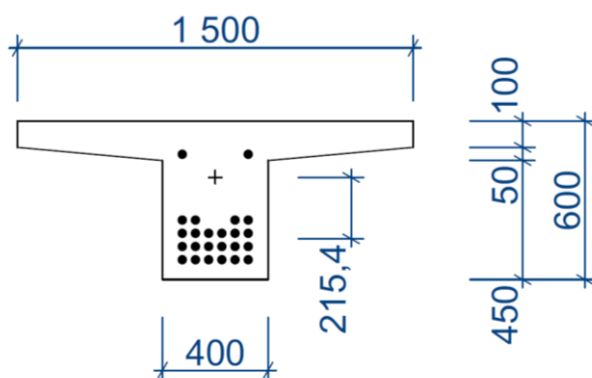
Metoda mezní rovnováhy	fcd	[MPa]	17,00
	ε _{cu3}	[-]	0,00
	f _{pd}	[MPa]	1426,09
	E _p	[MPa]	195000,00
	A _p	[mm ²]	3600,00
	Δσ _p	[MPa]	194,56
	ΔF _p	[kN]	700,43
	P	[kN]	4433,48
	F _c	[kN]	5133,91
	d	[mm]	679,17
	b	[mm]	1500,00
	η	[-]	0,80
	λ	[-]	0,70
	x	[mm]	359,52
	ξ _{bal}	[-]	0,78
	x _{lim}	[mm]	528,50
	z _p	[mm]	384,20
	z _c	[mm]	151,16
	M _{rd}	[kNm]	2748,49
	M _{ed}	[kNm]	2304,6
M _{rd} >M _{ed}		Vyhoví	

Tab. 4.14 - Posouzení nosníku smyk L15, C90/105

Únosnost ve smyku se smykovou výztuží	φ _{sw}	[mm]	14,00
	N _{sw}	[-]	2,00
	A _{sw}	[mm ²]	307,88
	s	[mm]	100,00
	z	[mm]	611,25
	f _{ywd}	[MPa]	434,78
	θ	[°]	45,00
	V _{rd,s}	[kN]	818,21
	σ _{cp}	[MPa]	11,74
	α _{cw}	[-]	1,23
	v _{1>0,5}	[-]	0,45
	v ₁	[-]	0,50
	b _w	[mm]	400,00
	V _{rd,max}	[kN]	3835,25
	V _{ed,(x=lpt2)}	[kN]	603,4
V _{rd} >V _{ed}		Vyhoví	

4.3 Srovnání nosníků pro rozpětí $L=15\text{ m}$

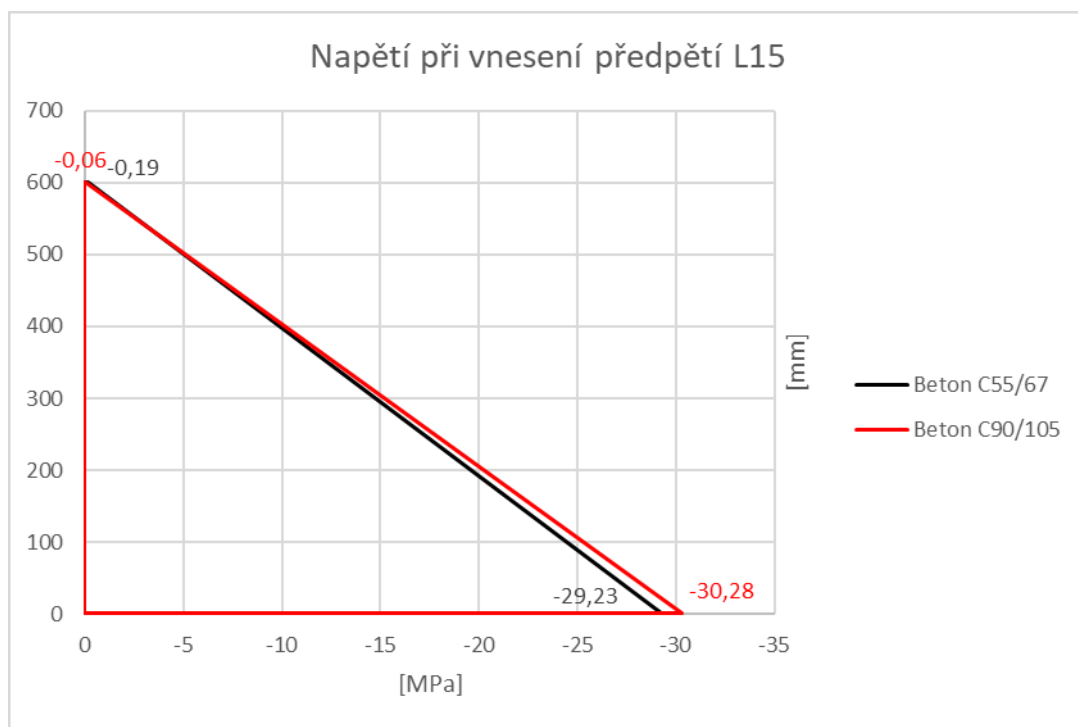
Na následujících obrázcích Obr. 4.11 až Obr. 4.15 můžeme vidět srovnání napětí v průřezu uprostřed nosníku. Nosníky jsou stejných rozměrů a stejně zatíženy. Rozdíl v napětí je dán především ztrátami napětí v předpínací výztuži. Pro beton C55/67 jsou větší ztráty dány především větším dotvarováním betonu. Z tohoto důvodu je v předpínací výztuži menší napětí viz Tab. 4.15. Z tohoto důvodu je tlakové napětí na spodní straně průřezu vždy menší než u betonu C90/105. Při charakteristické kombinaci se průřez na dolní straně dostává do tažené oblasti. Pro beton C55/67 je tahové napětí větší.



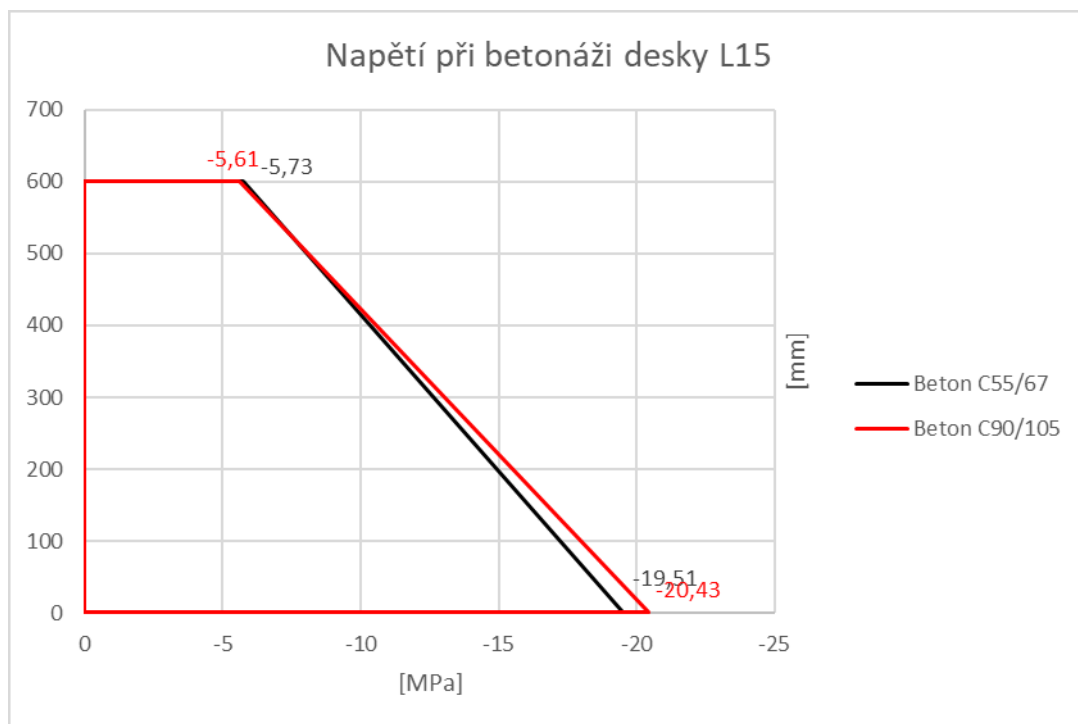
Obr. 4.10 - Předpětí uprostřed nosníku $L=15\text{ m}$

Tab. 4.15 - Srovnání napětí ve výztuži v čase t $L=15\text{ m}$

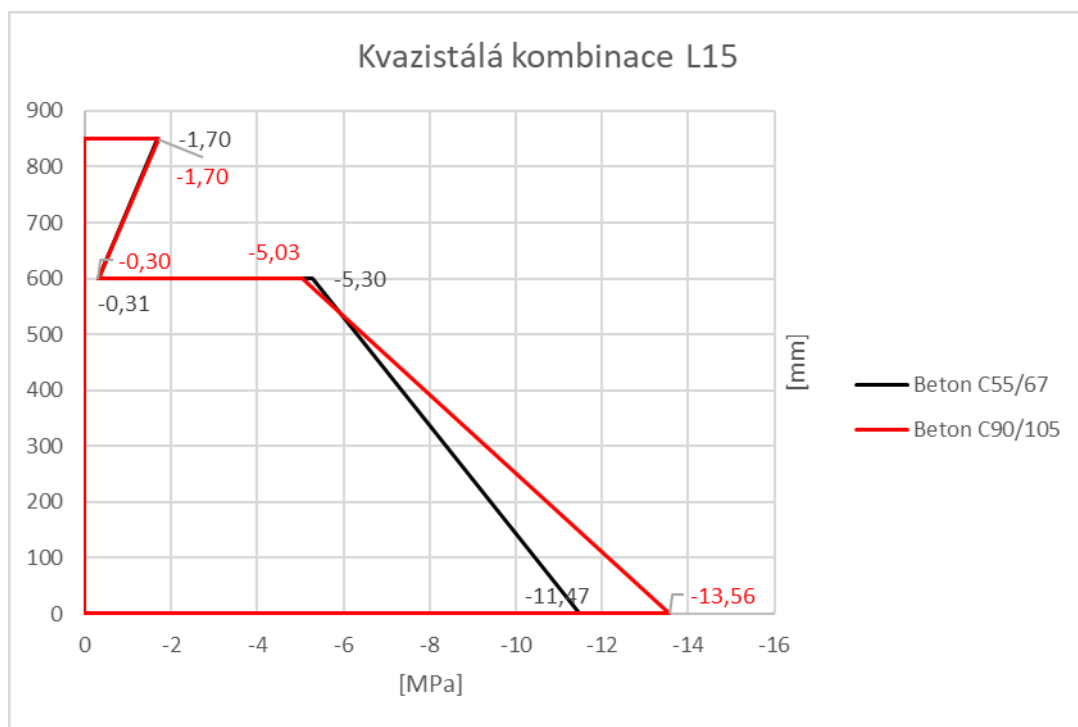
Napětí ve výztuži v čase t		C55/57	C90/105
$\sigma_{p,a}$	[MPa]	1212,84	1231,52
$\sigma_{p,28}$	[MPa]	1138,77	1156,26
$\sigma_{p,\infty}$	[MPa]	988,83	1051,26



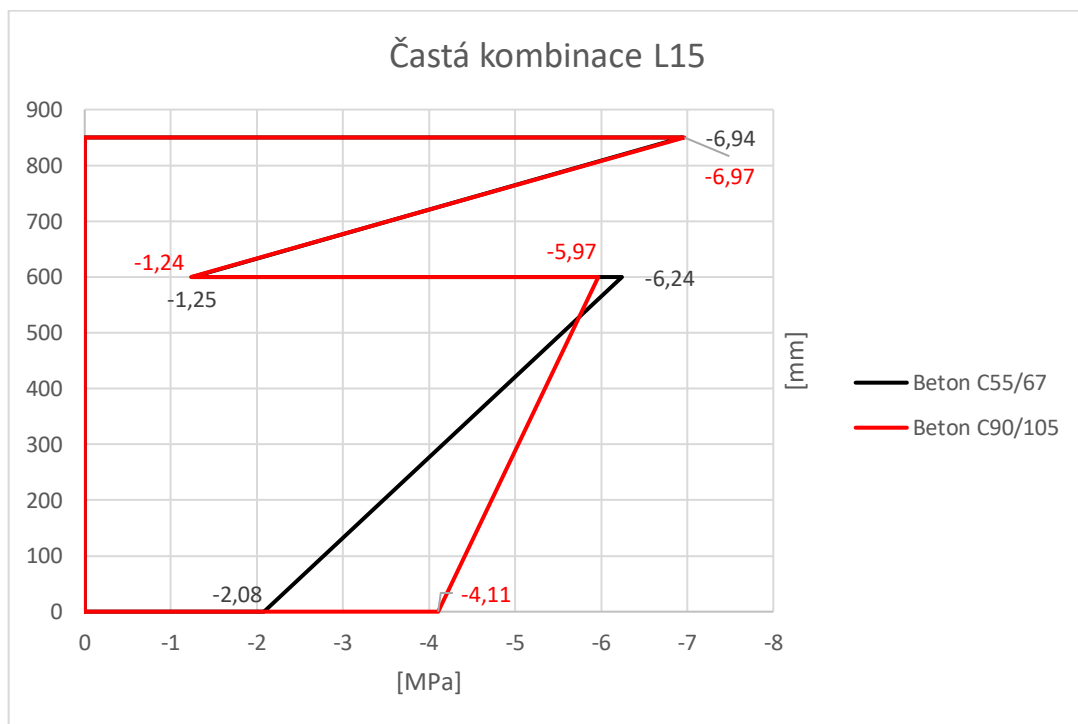
Obr. 4.11 - Napětí v průřezu v době vnesení předpětí $L=15\text{ m}$



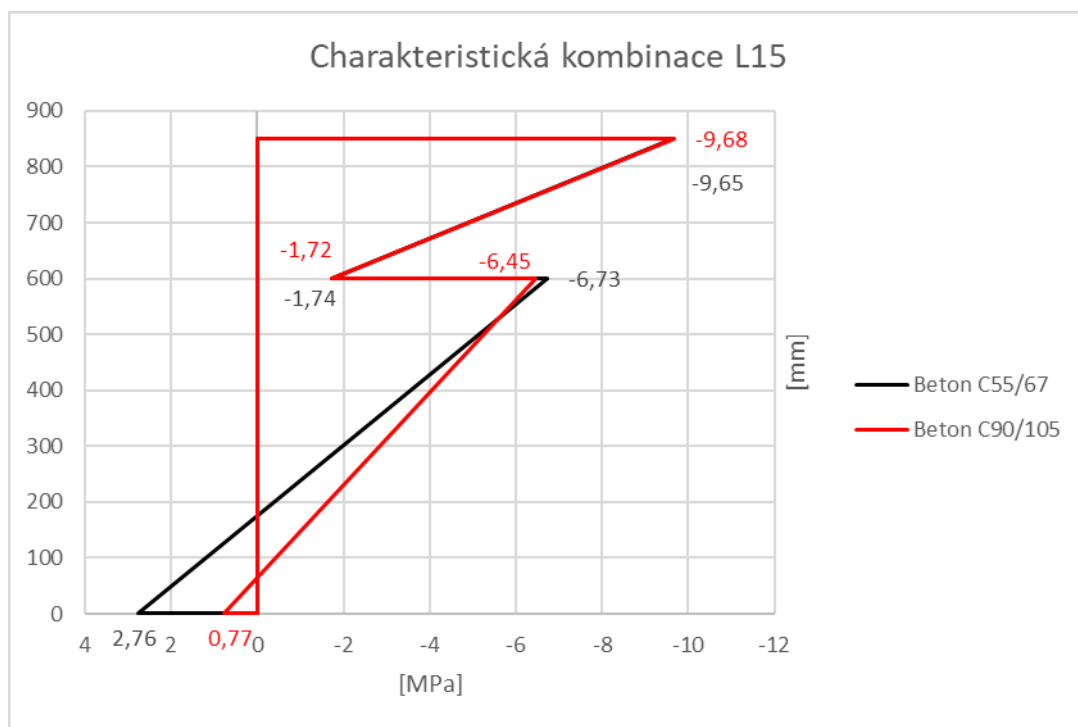
Obr. 4.12 - Napětí v průřezu v době betonáže desky $L=15\text{ m}$



Obr. 4.13 - Napětí ve výztuži kvazistálá kombinace $L=15\text{ m}$



Obr. 4.14 - Napětí v průřezu častá kombinace $L=15\text{ m}$

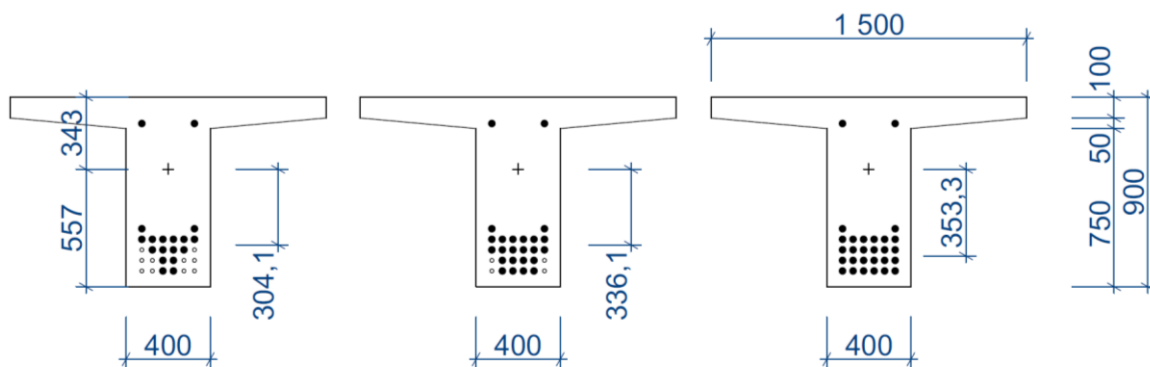


Obr. 4.15 - Napětí v průřezu charakteristická kombinace $L=15$ m

5 Návrh a posouzení nosníku $L=20$ m

Pro rozpětí 20 metrů byl navržen nosník výšky 900 mm. Šířka nosníku je 400 mm. Šířka horní příruby je 1500 mm. V pozdějších stadiích bude nosník spřažen s monolitickou deskou tloušťky 250 mm.

Pro rozpětí 20 m bylo navrženo 28 předem předpjatých lan. Z toho 26 u dolního okraje a dvě u horního okraje nosníku. Lana jsou separována dle následujícího obrázku. Separace je provedena symetricky z obou stran. Můžeme vidět 3 řezy nosníkem. První pro začátek nosníku, tj. do vzdálenosti $x=2$ m. V této vzdálenosti působí 18 lan. Druhý řez je pro vzdálenost 2 až 4 metry. V tomto řezu působí 24 lan. V posledním řezu pro vzdálenost 4 až 11 metrů působí všechna lana. Pro výpočet byla skupina lan nahrazena jedním lanem v těžišti předpínací výztuže. Na obrázku vidíme vzdálenost těžiště betonu od vzdálenosti těžiště předpínací výztuže. Lana jsou umístěna i separována symetricky.



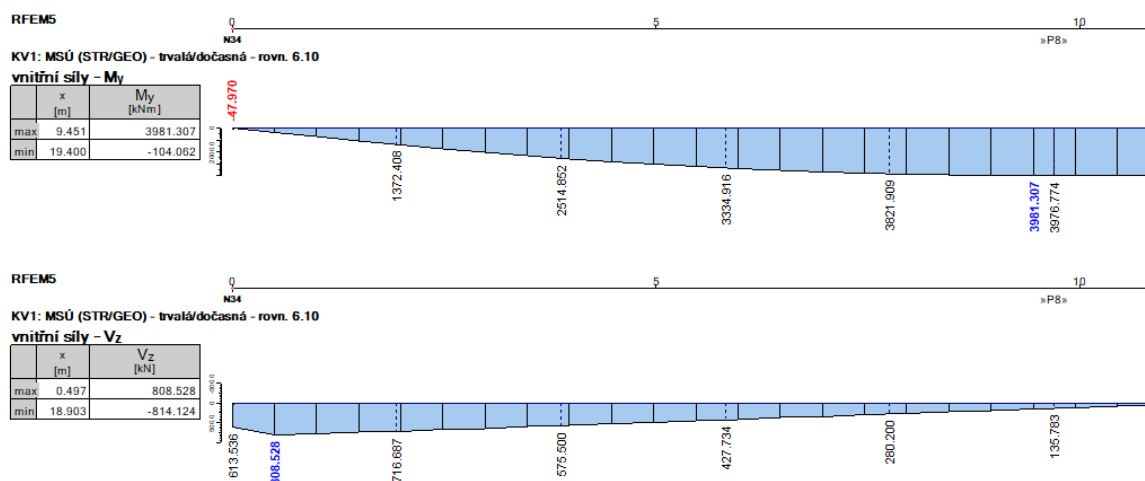
Obr. 5.1 - Schéma vyztužení nosníku $L=20\text{ m}$

5.1 Beton C55/67

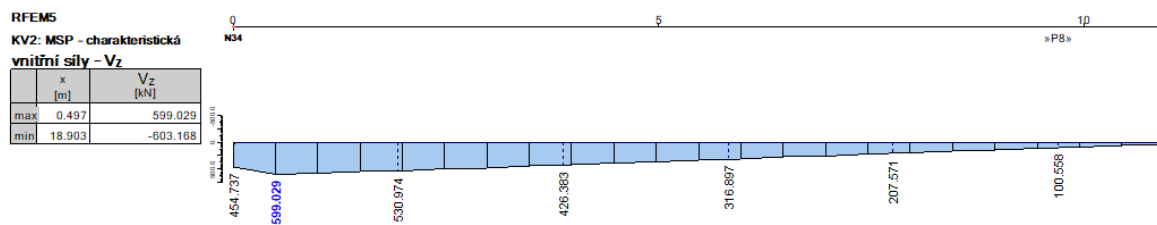
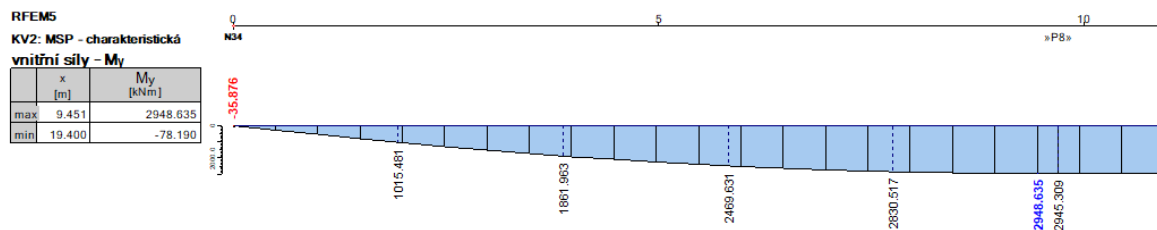
Postup výpočtu byl proveden dle kapitoly 3. Kvůli velkému množství výpočtů budou výsledky zobrazeny v názorných tabulkách. Pro výpočet byly uvažovány materiálové charakteristiky dle Tab. 3.1, Tab. 3.2 a Tab. 3.4.

5.1.1 Vnitřní síly

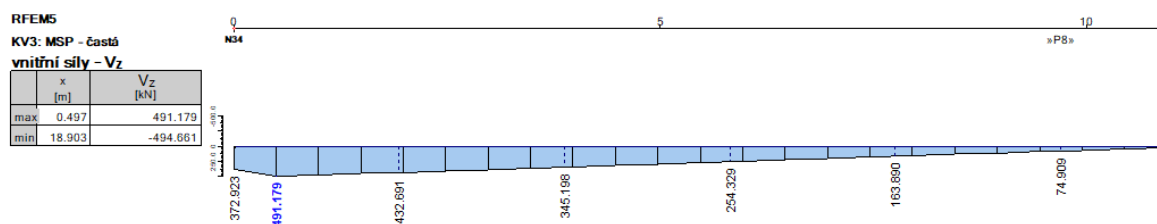
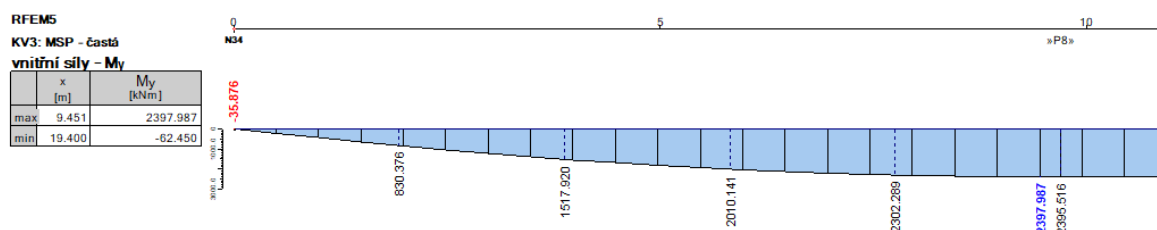
Jelikož se jedná o prostý nosník a výsledky jsou téměř symetrické, vnitřní síly jsou zobrazeny pro $\frac{1}{2}$ rozpětí pro lepší čitelnost. Výsledky jsou zobrazeny pro nejvíce namáhaný nosník.



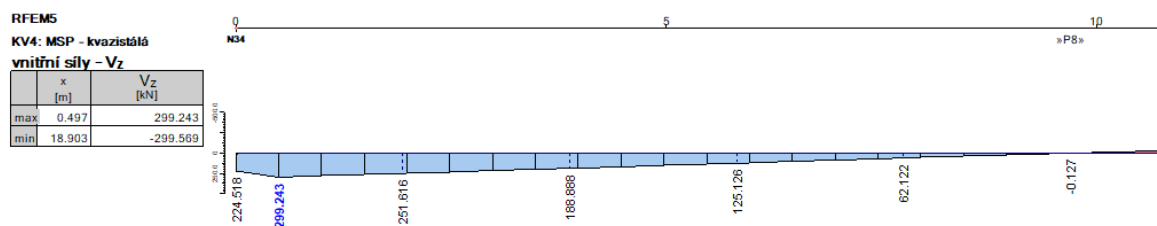
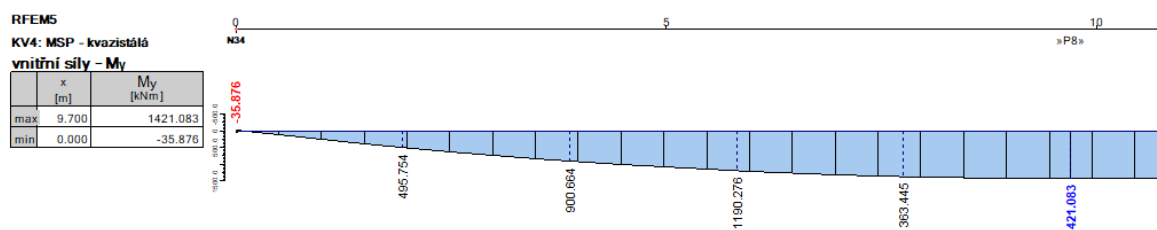
Obr. 5.2 - MSÚ-rovnice 6.10 $L20$, C55/67



Obr. 5.3 – MSP-charakteristická kombinace L20, C55/67



Obr. 5.4 - MSP-častá kombinace L20, C55/67



Obr. 5.5 - MSP-kvazistálá kombinace L20, C55/67

5.1.2 Návrh průřezu a předpětí

Výpočet ideálního průřezu byl proveden dle vzorců (3.12) až (3.19). V horní polovině tabulky se nachází výpočet pro nosník samostatný. V dolní polovině pro nosník společně s deskou.

Tab. 5.1 - Výpočet ideálního průřezu

Vzdálenost [mm]:			lpt1+a	lpt1+2m+a	lpt1+4m+a	l/2
			1007,19	3007,19	5007,19	10000
Počet prutů předpínací výztuže			18	24	28	28
Ideální průřez - T průřez	Ac	[mm ²]	497500,00	497500,00	497500,00	497500,00
	Ecm	[Mpa]	38000,00	38000,00	38000,00	38000,00
	agcd	[mm]	556,90	556,90	556,90	556,90
	Ic	[mm ⁴]	3,90E+10	3,90E+10	3,90E+10	3,90E+10
	Ap [mm ²]	[mm ²]	2700,00	3600,00	4200,00	4200,00
	Ep	[Mpa]	195000,00	195000,00	195000,00	195000,00
	ep	[mm]	304,12	336,07	353,33	353,33
	Ip	[mm ⁴]	53683,52	71578,03	83507,70	83507,70
	αE	[-]	5,13	5,13	5,13	5,13
	Ai	[mm ²]	511355,26	515973,68	519052,63	519052,63
	ti	[mm]	8,24	12,03	14,67	14,67
	agid	[mm]	548,66	544,87	542,23	542,23
	agih	[mm]	351,34	355,13	357,77	357,77
	Ii	[mm ⁴]	4,02E+10	4,10E+10	4,16E+10	4,16E+10
	ei	[mm]	295,88	324,03	338,66	338,66
Ideální průřez - T průřez společně s deskou	Ac		872500,00	872500,00	872500,00	872500,00
	agcd		758,09	758,09	758,09	758,09
	Ec		35851,00	35851,00	35851,00	35851,00
	Ic		8,78E+10	8,78E+10	8,78E+10	8,78E+10
	Ap [mm ²]	[mm ²]	2700,00	3600,00	4200,00	4200,00
	Ep	[Mpa]	195000,00	195000,00	195000,00	195000,00
	ep	[mm]	505,31	537,26	554,52	554,52
	Ip	[mm ⁴]	53683,52	71578,03	83507,70	83507,70
	αE	[-]	5,44	5,44	5,44	5,44
	Ai	[mm ²]	887185,78	892081,04	895344,55	895344,55
	ti	[mm]	8,36	11,79	14,15	14,15
	agid	[mm]	749,72	746,30	743,94	743,94
	agih	[mm]	400,28	403,70	406,06	406,06
	Ii	[mm ⁴]	9,15E+10	9,33E+10	9,47E+10	9,47E+10
	ei	[mm]	496,95	525,46	540,37	540,37

5.1.3 Kotvení předem předpjaté výztuže

Výpočet délky kotvení předem předpjaté výztuže byl proveden dle vzorců (3.20) až (3.22).

Tab. 5.2 - Výpočet délky kotvení předem předpjaté výztuže L20, C55/67

Délka přenosu síly l_{pt}	η_{p1}	[-]	3,20
	η_1	[-]	1,00
	$f_{ctm}(1den)$	[MPa]	3,15
	α_{ct}		1,00
	$f_{ctd}(1den)$	[MPa]	1,47
	f_{bpt}	[MPa]	4,70
	α_1	[-]	1,00
	α_2	[-]	0,19
	ϕ	[mm]	15,70
	σ_{pm0}	[MPa]	1394,00
	l_{pt}	[mm]	883,99
	l_{pt1}	[mm]	707,19
	l_{pt2}	[mm]	1060,79
	l_{dis}	[mm]	1125,37

5.1.4 Ztráty předpětí

Výpočet ztrát předpětí byl proveden dle vzorců (3.23) až (3.36). Výpočet dotvarování a smršťování viz příloha A3.

Tab. 5.3 - Krátkodobé ztráty předpětí L20, C55/67

Krátkodobé ztráty		
$\sigma_{p,max}$	[Mpa]	1488
$A_{p,1}$	[mm ²]	150
Ztráta pokluzem v kotvě		
w	[mm]	4,00
L	[m]	20,00
$\Delta\sigma_w$	[MPa]	39,00
Ztráta deformací výrobní dráhy		
w	[mm]	4,00
L	[m]	20,00
$\Delta\sigma_w$	[MPa]	39,00
Ztráta relaxací výztuže před vnesením předpětí		
Třída rel. Chování		2,00
$\sigma_{p,a}$	[MPa]	1410,00
ρ_{1000}	[%]	2,50
μ	[-]	0,76
Tmax	[°C]	40,00
Δt	[hod]	12,00
teq	[hod]	164,92
t1	[hod]	48,00
t	[hod]	200,92
$\Delta\sigma_{pr}$	[MPa]	17,23
Ztráta při tepelném ošetřování		
α_c	[1/K]	1,00E-05
Tmax	[°C]	40,00
T0	[°C]	20,00
$\Delta\sigma_\theta$	[MPa]	19,50
Ztráta okamžitou deformací betonu		
σ_p	[Mpa]	1373,27
P	[kN]	5767,75
σ_{cp}	[MPa]	-24,20
$\Delta\epsilon_{cp}$	[-]	0,00
$\Delta\sigma_{el}$	[MPa]	124,17
$\sigma_{p,a}$	[MPa]	1249,11
Relaxace		
$\sigma_{p,a}$	[MPa]	1410,00
ρ_{1000}	[%]	2,50
μ	[-]	0,76
t	[hod]	500000,00
$\Delta\sigma_{pr,57}$	[MPa]	71,18
$\Delta\sigma_{pr,28}$	[MPa]	21,44

Tab. 5.4 - Dlouhodobé ztráty L20, C55/67

Dlouhodobé ztráty			
Čas		28dní	100let
ϵ_{cs}	[-]	9,20E-05	6,42E-04
$\Delta\sigma_{pr}$	[MPa]	21,44	71,18
$\varphi(t,t_0)$		0,595	1,437
z_{cp}		353,33	353,33
σ_{cp}	[MPa]	-16,12	-13,00
$\Delta\sigma_p$	[MPa]	72,32	223,95
σ_p	[MPa]	1176,79	1025,15
P		4942,50	4305,63
Rekapitulace napětí		Předpokládané napětí	
$\sigma_{p,a}$	[MPa]	1249,11	1264,8
$\sigma_{p,28}$	[MPa]	1176,79	-
$\sigma_{p,\infty}$	[MPa]	1025,15	1075,08

5.1.5 Mezní stav použitelnosti

V následující tabulce můžeme vidět posudky pro mezní stav použitelnosti. Nosník byl posouzen ve 3 časových intervalech. V době zavedení předpětí, kdy nosník působí samostatně. V tomto čase na nosník působí maximální předpínací síla a nosník je nejméně zatížen. Druhý časový interval byl uvažován v čase 28 dní při betonáži železobetonové desky (mostovky). Nosník působí samostatně. Zatížení uvažováno jako 1,2násobek vlastní tíhy desky a nosníku. Tímto bylo zohledněno montážní zatížení a tíha čerstvého betonu. Poslední časový interval na konci životnosti (100 let). Nosník působí společně s deskou. Uvažována kvazistálá, častá a charakteristická kombinace zatížení.

Posudky byly provedeny dle vzorců (3.30) až (3.37). Napětí v průřezu se vypočítá podle vzorců (3.10) a (3.11).

Tab. 5.5 - Posouzení nosníku-SLS L20, C55/67

Vzdálenost [mm]:		lpt1+a	lpt1+2m+a	lpt1+4m +a	l/2
		1007,19	3007,19	5007,19	10000
Počet prutů předpínací výztuže		18	24	28	28
Napětí v průřezu po uvolnění předpínací výztuže					
rsup	1,05				
Pa	[kN]	3372,59	4496,78	5246,24	5246,24
Mg0	[kNm]	123,72	330,49	485,53	646,75
σd	[MPa]	-21,21	-23,68	-27,01	-24,84
σh	[MPa]	2,22	1,04	0,94	-0,38
Podmínka:		$ \sigma \leq \{0,7f_{ck}; f_{ctm}\}$		38,50	4,20 Vyhoví
Napětí v průřezu při betonáži desky					
rsup	1,05				
P,28	[kN]	3177,32	4236,43	4942,50	4942,50
1,2*Mg1	[kNm]	162,84	580,80	903,84	1246,44
σd	[MPa]	-17,76	-20,05	-21,13	-16,66
σh	[MPa]	0,67	-1,17	-2,65	-5,60
Podmínka:		$ \sigma \leq \{0,45f_{ck}; f_{ctm}\}$		24,75	4,20 Vyhoví
Napětí v průřezu kvazistálá kombinace					
rinf	0,95				
P,∞	[kN]	2767,91	3690,54	4305,63	4305,63
Mg1	[kNm]	135,70	484,00	753,20	1038,70
Mkv	[kNm]	171,40	667,50	1037,10	1421,10
σd	[MPa]	-13,61	-13,99	-13,89	-9,39
σh	[MPa]	0,41	-1,45	-2,91	-5,53
σh´	[MPa]	-0,06	-0,30	-0,47	-0,63
σh2	[MPa]	-0,16	-0,79	-1,22	-1,64
Podmínka:		$ \sigma \leq \{0,45f_{ck}; f_{ctm}\}$		24,75	13,50 Vyhoví
Napětí v průřezu častá kombinace					
rinf	0,95				
P,∞	[kN]	2767,91	3690,54	4305,63	4305,63
Mg1	[kNm]	135,70	484,00	753,20	1038,70
Mč	[kNm]	296,10	1123,10	1748,50	2398,00
σd	[MPa]	-12,58	-10,35	-8,30	-1,72
σh	[MPa]	0,20	-2,20	-4,08	-7,14
σh´	[MPa]	-0,26	-1,05	-1,64	-2,24
σh2	[MPa]	-0,70	-2,76	-4,27	-5,83
Podmínka:		Dekomprese Výztuž v tlačené oblasti x>100		351,81	Vyhoví
Napětí v průřezu charakteristická kombinace					
rinf	0,95				
P,∞	[kN]	2767,91	3690,54	4305,63	4305,63
Mg1	[kNm]	135,70	484,00	753,20	1038,70
Mch	[kNm]	362,00	1375,60	2146,40	2948,60
σd	[MPa]	-12,04	-8,33	-5,17	2,61
σh	[MPa]	0,09	-2,62	-4,74	-8,05
σh´	[MPa]	-0,37	-1,47	-2,30	-3,15
σh2	[MPa]	-0,99	-3,86	-5,98	-8,19
Podmínka:		$ \sigma \leq \{0,6f_{ck}; f_{ctm}\}$		33,00	18,00
				Vyhoví	
Napětí v předpínací výztuži					
		σp	<	0,75 fpk	
σp,a	[Mpa]	1249,11	<	1395	Vyhoví
σp,28	[Mpa]	1176,79	<	1395	Vyhoví
σp,∞	[Mpa]	1025,15	<	1395	Vyhoví

5.1.6 Mezní stav únosnosti

Posudky na mezní stav únosnosti byly provedeny dle vzorců (3.41) až (3.49).

Tab. 5.6 - Posouzení nosníku na ohyb L20, C55/67

Metoda mezní rovnováhy	fcd	[MPa]	17,00
	ϵ_{cu3}	[-]	0,0035
	fpd	[MPa]	1426,09
	Ep	[MPa]	195000,00
	Ap	[mm ²]	4200,00
	$\Delta\sigma_p$	[MPa]	176,98
	ΔF_p	[kN]	743,32
	P	[kN]	5246,24
	Fc	[kN]	5989,57
	d	[mm]	946,43
	b	[mm]	1500,00
	η	[-]	0,98
	λ	[-]	0,79
	x	[mm]	305,91
	ξ_{bal}	[-]	0,79
	xlim	[mm]	751,54
	zp	[mm]	554,52
	zc	[mm]	269,55
	Mrd	[kNm]	4935,78
	Med	[kNm]	3981,3
	Mrd>Med		Vyhoví

Tab. 5.7 - Posouzení nosníku na smyk L20, C55/67

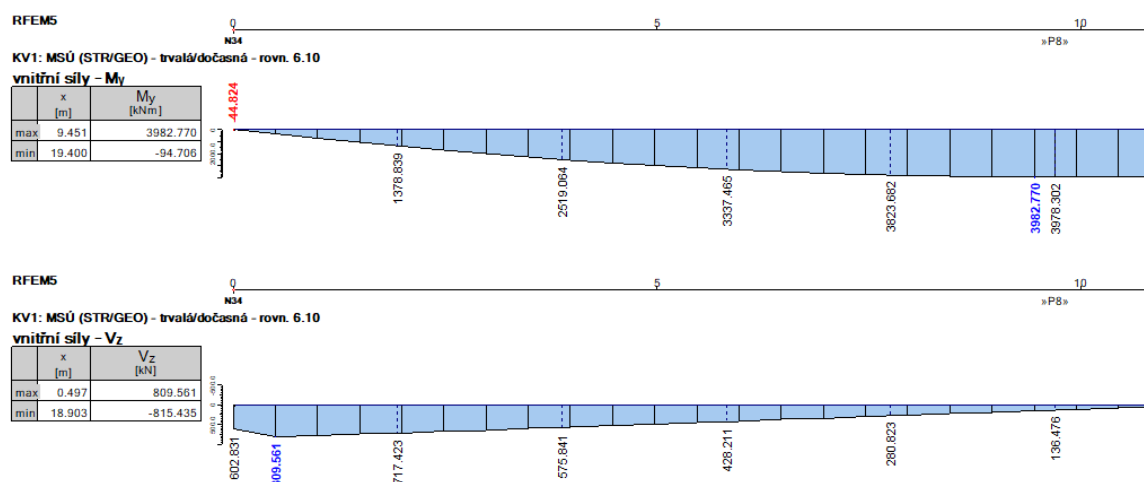
Únosnost ve smyku se smykovou výztuží	ϕ_{sw}	[mm]	12,00
	Nsw	[-]	2,00
	Asw	[mm ²]	226,19
	s	[mm]	100,00
	z	[mm]	851,79
	fywd	[MPa]	434,78
	θ	[°]	45,00
	Vrd,s	[kN]	837,69
	σ_{cp}	[MPa]	10,55
	α_{cw}	[-]	1,25
	v1>0,5	[-]	0,60
	v1	[-]	0,60
	bw	[mm]	400,00
	Vrd,max	[kN]	3982,10
	Ved,(x=lpt2)	[kN]	781,5
	Vrd>Ved		Vyhoví

5.2 Beton C90/105

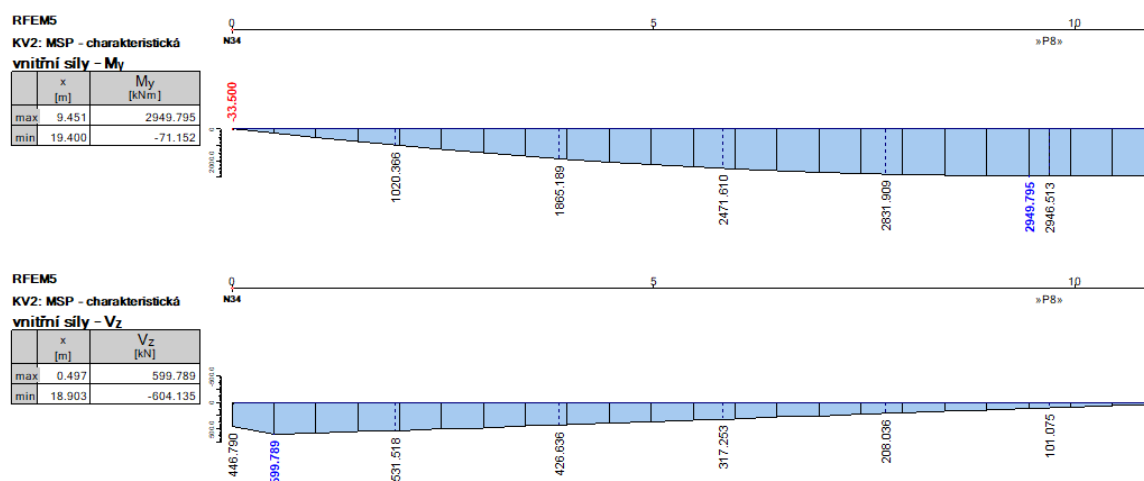
Postup výpočtu byl proveden dle kapitoly 3. Kvůli velkému množství výpočtů budou výsledky zobrazeny v názorných tabulkách. Pro výpočet byly uvažovány materiálové charakteristiky dle Tab. 3.1, Tab. 3.3 a Tab. 3.4.

5.2.1 Vnitřní síly

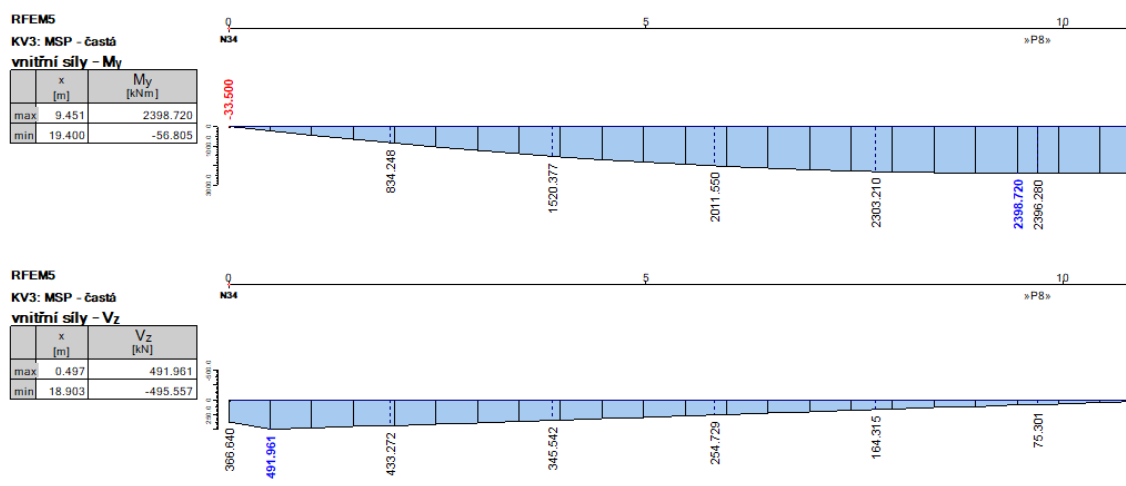
Jelikož se jedná o prostý nosník a výsledky jsou téměř symetrické, vnitřní síly jsou zobrazeny pro $\frac{1}{2}$ rozpětí pro lepší čitelnost. Výsledky jsou zobrazeny pro nejvíce namáhaný nosník.



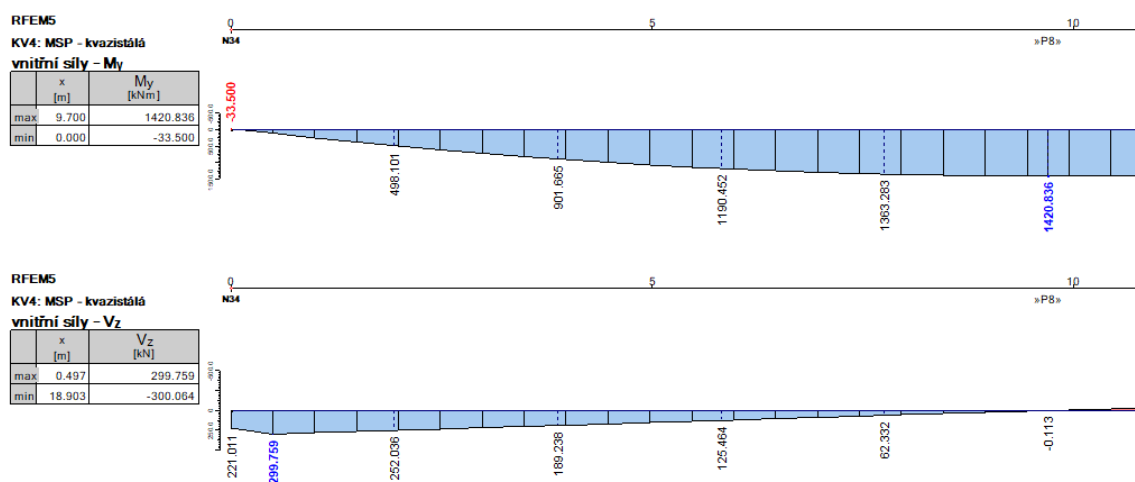
Obr. 5.6 - MSÚ-rovnice 6.10 L20, C90/105



Obr. 5.7 - MSP-charakteristická kombinace L20, C90/105



Obr. 5.8 - MSP-částá kombinace L20, C90/105



Obr. 5.9 - MSP-kvazistálá kombinace L20, C90/105

5.2.2 Ideální průřez

Výpočet ideálního průřezu byl proveden dle vzorců (3.12) až (3.19). V horní polovině tabulky se nachází výpočet pro nosník samostatný. V dolní polovině pro nosník společně s deskou.

Tab. 5.8 - Výpočet ideálního průřezu L20, C90/105

Vzdálenost [mm]:			lpt1+a	lpt1+2m+a	lpt1+4m+a	l/2
			894,04	2894,04	4894,04	10000
Počet prutů předpínací výztuže			18	24	28	28
Ideální průřez - T průřez	Ac	[mm ²]	497500,00	497500,00	497500,00	497500,00
	Ecm	[Mpa]	44000,00	44000,00	44000,00	44000,00
	agcd	[mm]	556,90	556,90	556,90	556,90
	Ic	[mm ⁴]	3,90E+10	3,90E+10	3,90E+10	3,90E+10
	Ap [mm ²]	[mm ²]	2700,00	3600,00	4200,00	4200,00
	Ep	[Mpa]	195000,00	195000,00	195000,00	195000,00
	ep	[mm]	304,12	336,07	353,33	353,33
	Ip	[mm ⁴]	53683,52	71578,03	83507,70	83507,70
	αE	[-]	4,43	4,43	4,43	4,43
	Ai	[mm ²]	509465,91	513454,55	516113,64	516113,64
	ti	[mm]	7,14	10,44	12,74	12,74
	agid	[mm]	549,76	546,46	544,16	544,16
	agih	[mm]	350,24	353,54	355,84	355,84
	Ii	[mm ⁴]	4,01E+10	4,07E+10	4,12E+10	4,12E+10
	ei	[mm]	296,98	325,62	340,59	340,59
Ideální průřez - T průřez společně s deskou	Ac		872500,00	872500,00	872500,00	872500,00
	agcd		758,09	758,09	758,09	758,09
	Ec		39272,21	39272,21	39272,21	39272,21
	Ic		8,78E+10	8,78E+10	8,78E+10	8,78E+10
	Ap [mm ²]	[mm ²]	2700,00	3600,00	4200,00	4200,00
	Ep	[Mpa]	195000,00	195000,00	195000,00	195000,00
	ep	[mm]	505,31	537,26	554,52	554,52
	Ip	[mm ⁴]	53683,52	71578,03	83507,70	83507,70
	αE	[-]	4,97	4,97	4,97	4,97
	Ai	[mm ²]	885906,43	890375,24	893354,44	893354,44
	ti	[mm]	7,65	10,79	12,94	12,94
	agid	[mm]	750,44	747,30	745,14	745,14
	agih	[mm]	399,56	402,70	404,86	404,86
	Ii	[mm ⁴]	9,12E+10	9,29E+10	9,41E+10	9,41E+10
	ei	[mm]	497,66	526,47	541,57	541,57

5.2.3 Kotvení předem předpjaté výztuže

Výpočet délky kotvení předem předpjaté výztuže byl proveden dle vzorců (3.20) až (3.22).

Tab. 5.9 - Výpočet délky kotvení předem předpjaté výztuže L20, C90/105

Délka přenosu síly l_{pt}	η_{p1}	[-]	3,20
	η_1	[-]	1,00
	$f_{ctm}(1den)$	[MPa]	3,75
	α_{ct}		1,00
	$f_{ctd}(1den)$	[MPa]	1,75
	f_{bpt}	[MPa]	5,60
	α_1	[-]	1,00
	α_2	[-]	0,19
	ϕ	[mm]	15,70
	σ_{pm0}	[MPa]	1394,00
	l_{pt}	[mm]	742,55
	l_{pt1}	[mm]	594,04
	l_{pt2}	[mm]	891,06
	l_{dis}	[mm]	1018,04

5.2.4 Ztráty předpětí

Výpočet ztrát předpětí byl proveden dle vzorců (3.23) až (3.36). Výpočet dotvarování a smršťování viz příloha A4.

Tab. 5.10 - Výpočet krátkodobých ztrát L20, C90/105

Krátkodobé ztráty		
$\sigma_{p,max}$	[Mpa]	1488
$A_{p,1}$	[mm ²]	150
Ztráta pokluzem v kotvě		
w	[mm]	4,00
L	[m]	20,00
$\Delta\sigma_w$	[MPa]	39,00
Ztráta deformací výrobní dráhy		
w	[mm]	4,00
L	[m]	20,00
$\Delta\sigma_w$	[MPa]	39,00
Ztráta relaxací výztuže před vnesením předpětí		
Třída rel. Chování		2,00
$\sigma_{p,a}$	[MPa]	1410,00
ρ_{1000}	[%]	2,50
μ	[-]	0,76
Tmax	[°C]	40,00
Δt	[hod]	12,00
t_{eq}	[hod]	164,92
t1	[hod]	48,00
t	[hod]	200,92
$\Delta\sigma_{pr}$	[MPa]	17,23
Ztráta při tepelném ošetřování		
α_c	[1/K]	1,00E-05
Tmax	[°C]	40,00
T0	[°C]	20,00
$\Delta\sigma_\theta$	[MPa]	19,50
Ztráta okamžitou deformací betonu		
σ_p	[Mpa]	1373,27
P	[kN]	5767,75
σ_{cp}	[MPa]	-24,20
$\Delta\epsilon_{cp}$	[-]	0,00
$\Delta\sigma_{el}$	[MPa]	107,24
$\sigma_{p,a}$	[MPa]	1266,04
Relaxace		
$\sigma_{p,a}$	[MPa]	1410,00
ρ_{1000}	[%]	2,50
μ	[-]	0,76
t	[hod]	500000,00
$\Delta\sigma_{pr,57}$	[MPa]	71,18
$\Delta\sigma_{pr,28}$	[MPa]	21,44

Tab. 5.11 - Výpočet dlouhodobých ztrát L20, C90/105

Dlouhodobé ztráty			
Čas		28dní	100let
ϵ_{cs}	[-]	1,51E-04	4,81E-04
$\Delta\sigma_{pr}$	[MPa]	21,44	71,18
$\varphi(t,t_0)$		0,516	1,045
z_{cp}		353,33	353,33
σ_{cp}	[MPa]	-16,69	-13,53
$\Delta\sigma_p$	[MPa]	74,55	181,12
σ_p	[MPa]	1191,49	1084,91
P		5004,26	4556,64
Rekapitulace napětí			Předpokládané napětí
$\sigma_{p,a}$	[MPa]	1266,04	1264,8
$\sigma_{p,28}$	[MPa]	1191,49	-
$\sigma_{p,\infty}$	[MPa]	1084,91	1075,08

5.2.5 Mezní stav použitelnosti

V následující tabulce můžeme vidět posudky pro mezní stav použitelnosti. Nosník byl posouzen ve 3 časových intervalech. V době zavedení předpětí, kdy nosník působí samostatně. V tomto čase na nosník působí maximální předpínací síla a nosník je nejméně zatížen. Druhý časový interval byl uvažován v čase 28 dní při betonáži železobetonové desky (mostovky). Nosník působí samostatně. Zatížení uvažováno jako 1,2násobek vlastní tíhy desky a nosníku. Tímto bylo zohledněno montážní zatížení a tíha čerstvého betonu. Poslední časový interval na konci životnosti (100 let). Nosník působí společně s deskou. Uvažována kvazistálá, častá a charakteristická kombinace zatížení.

Posudky byly provedeny dle vzorců (3.30) až (3.37). Napětí v průřezu se vypočítá podle vzorců (3.10) a (3.11).

Tab. 5.12 - Posouzení nosníku-SLS L20, C90/105

Vzdálenost [mm]:		lpt1+a	lpt1+2m+a	lpt1+4m +a	l/2
		894,04	2894,04	4894,04	10000
Počet prutů předpínací výztuže		18	24	28	28
Napětí v průřezu po uvolnění předpínací výztuže					
rsup	1,05				
Pa	[kN]	3418,30	4557,74	5317,36	5317,36
Mg0	[kNm]	110,47	320,18	478,14	646,75
σd	[MPa]	-21,67	-24,49	-27,94	-25,66
σh	[MPa]	2,27	1,22	1,14	-0,26
Podmínka:		$ \sigma \leq \{0,7f_{ck}; f_{ctm}\}$		63,00	5,00 Vyhoví
Napětí v průřezu při betonáži desky					
rsup	1,05				
P,28	[kN]	3217,02	4289,36	5004,26	5004,26
1,2*Mg1	[kNm]	137,76	560,04	887,95	1245,36
σd	[MPa]	-18,50	-20,93	-22,08	-17,36
σh	[MPa]	0,93	-0,91	-2,40	-5,48
Podmínka:		$ \sigma \leq \{0,45f_{ck}; f_{ctm}\}$		40,50	5,00 Vyhoví
Napětí v průřezu kvazistálá kombinace					
rinf	0,95				
P,∞	[kN]	2929,27	3905,69	4556,64	4556,64
Mg1	[kNm]	114,80	466,70	739,96	1037,80
Mkv	[kNm]	145,50	648,00	1020,50	1420,80
σd	[MPa]	-14,97	-15,71	-15,85	-11,11
σh	[MPa]	0,71	-1,09	-2,51	-5,25
σh´	[MPa]	-0,05	-0,30	-0,46	-0,63
σh2	[MPa]	-0,13	-0,79	-1,21	-1,65
Podmínka:		$ \sigma \leq \{0,45f_{ck}; f_{ctm}\}$		40,50	13,50 Vyhoví
Napětí v průřezu častá kombinace					
rinf	0,95				
P,∞	[kN]	2929,27	3905,69	4556,64	4556,64
Mg1	[kNm]	114,80	466,70	739,96	1037,80
Mč	[kNm]	255,30	1091,10	1720,50	2398,70
σd	[MPa]	-14,07	-12,15	-10,31	-3,37
σh	[MPa]	0,53	-1,82	-3,66	-6,86
σh´	[MPa]	-0,23	-1,03	-1,61	-2,24
σh2	[MPa]	-0,62	-2,71	-4,22	-5,86
Podmínka:		Dekomprese Výztuž v tlačené oblasti x>100		934,56	Vyhoví
Napětí v průřezu charakteristická kombinace					
rinf	0,95				
P,∞	[kN]	2929,27	3905,69	4556,64	4556,64
Mg1	[kNm]	114,80	466,70	739,96	1037,80
Mch	[kNm]	312,70	1336,30	2111,90	2949,80
σd	[MPa]	-13,59	-10,17	-7,21	1,00
σh	[MPa]	0,43	-2,22	-4,31	-7,77
σh´	[MPa]	-0,32	-1,43	-2,26	-3,15
σh2	[MPa]	-0,87	-3,77	-5,90	-8,23
Podmínka:		$ \sigma \leq \{0,6f_{ck}; f_{ctm}\}$		54,00	18,00
					Vyhoví
Napětí v předpínací výztuži					
		σp	<	0,75 fpk	
σp,a	[Mpa]	1266,04	<	1395	Vyhoví
σp,28	[Mpa]	1191,49	<	1395	Vyhoví
σp,∞	[Mpa]	1084,91	<	1395	Vyhoví

5.2.6 Mezní stav únosnosti

Posudky na mezní stav únosnosti byly provedeny dle vzorců (3.41) až (3.49).

Tab. 5.13 - Posouzení nosníku na ohyb L20, C90/105

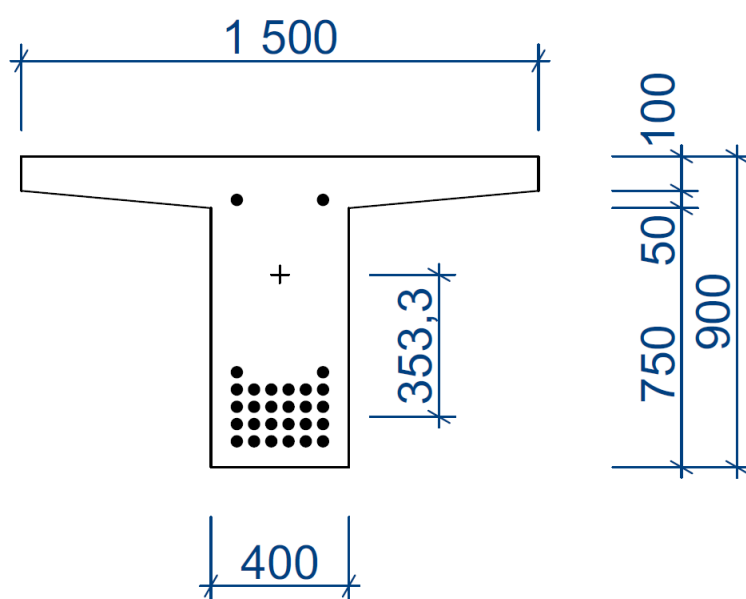
Metoda mezní rovnováhy	fcd	[MPa]	17,00
	ε _{cu3}	[-]	0,00
	f _{pd}	[MPa]	1426,09
	E _p	[MPa]	195000,00
	A _p	[mm ²]	4200,00
	Δσ _p	[MPa]	160,05
	ΔF _p	[kN]	672,21
	P	[kN]	5317,36
	F _c	[kN]	5989,57
	d	[mm]	946,43
	b	[mm]	1500,00
	η	[-]	0,80
	λ	[-]	0,70
	x	[mm]	419,44
	ξ _{bal}	[-]	0,81
	x _{lim}	[mm]	766,65
	z _p	[mm]	554,52
	z _c	[mm]	224,14
	M _{rd}	[kNm]	4663,80
	M _{ed}	[kNm]	3982,8
M _{rd} >M _{ed}		Vyhoví	

Tab. 5.14 - Posouzení nosníku na smyk L20, C90/105

Únosnost ve smyku se smykovou výztuží	φ _{sw}	[mm]	12,00
	N _{sw}	[-]	2,00
	A _{sw}	[mm ²]	226,19
	s	[mm]	100,00
	z	[mm]	851,79
	f _{ywd}	[MPa]	434,78
	θ	[°]	45,00
	V _{rd,s}	[kN]	837,69
	σ _{cp}	[MPa]	10,69
	α _{cw}	[-]	1,21
	v _{1>0,5}	[-]	0,45
	v ₁	[-]	0,50
	b _w	[mm]	400,00
	V _{rd,max}	[kN]	5254,51
	V _{ed,(x=lpt2)}	[kN]	782,7
V _{rd} >V _{ed}		Vyhoví	

5.3 Srovnání nosníků pro rozpětí $L=20$ m

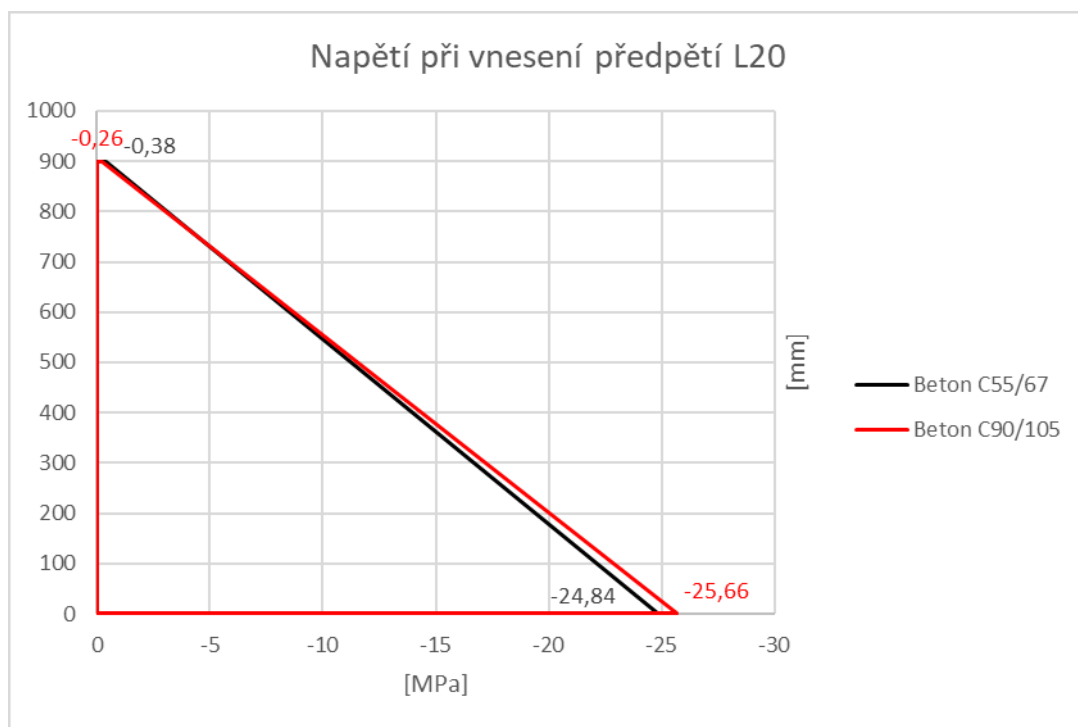
Nosníky budou srovnány z hlediska napětí v mezním stavu použitelnosti. Na následujících obrázcích Obr. 5.11 až Obr. 5.15 můžeme vidět srovnání napětí v průřezu uprostřed nosníku. Nosníky jsou stejných rozměrů a stejně zatíženy. Rozdíl v napětí je dán především ztrátami napětí v předpínací výztuži. Pro beton C55/67 jsou větší ztráty dány především větším dotvarováním betonu. Z tohoto důvodu je v předpínací výztuži menší napětí viz Tab. 5.15. Z tohoto důvodu je tlakové napětí na spodní straně průřezu vždy menší než u betonu C90/105. Při charakteristické kombinaci se průřez na dolní straně dostává do tažené oblasti. Pro beton C55/67 je tahové napětí větší.



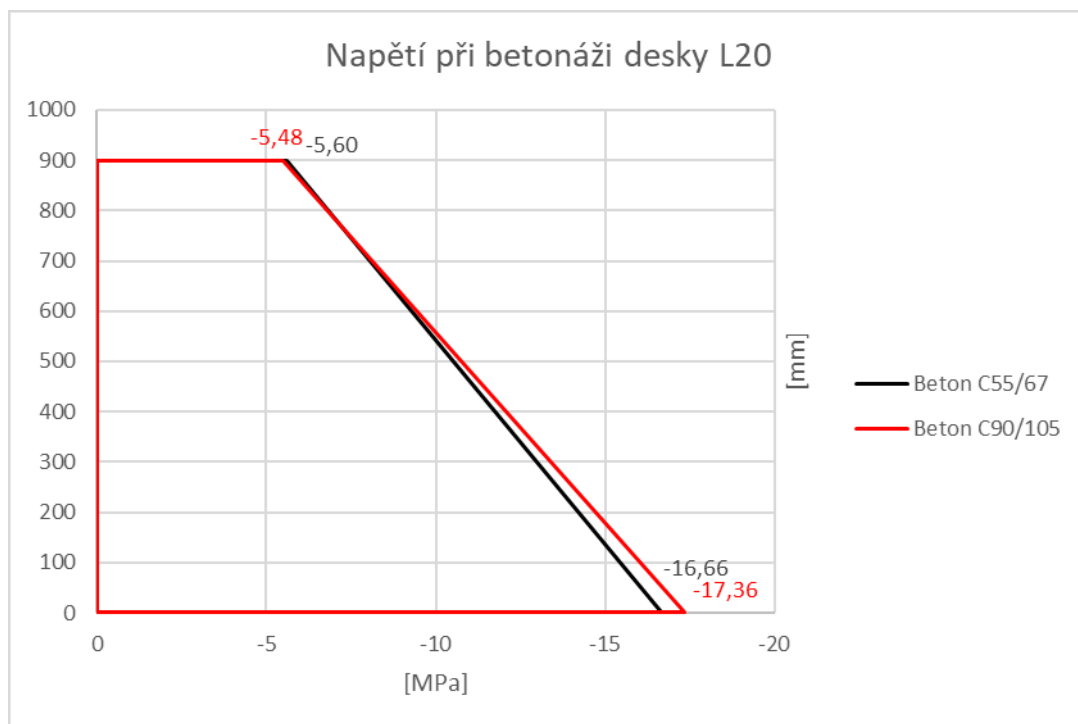
Obr. 5.10 – Předpětí uprostřed nosníku $L=20$ m

Tab. 5.15 - Srovnání napětí ve výztuži v čase t $L=20$ m

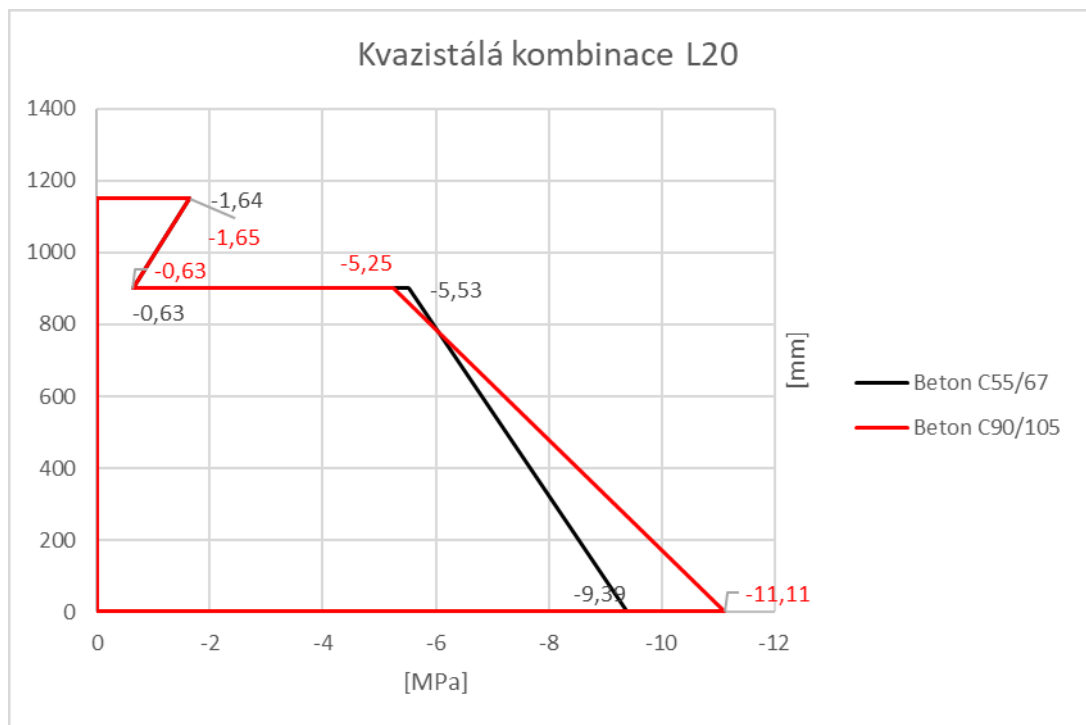
Napětí ve výztuži v čase t			
		C55/57	C90/105
$\sigma_{p,a}$	[MPa]	1249,11	1266,04
$\sigma_{p,28}$	[MPa]	1176,79	1191,49
$\sigma_{p,\infty}$	[MPa]	1025,15	1084,91



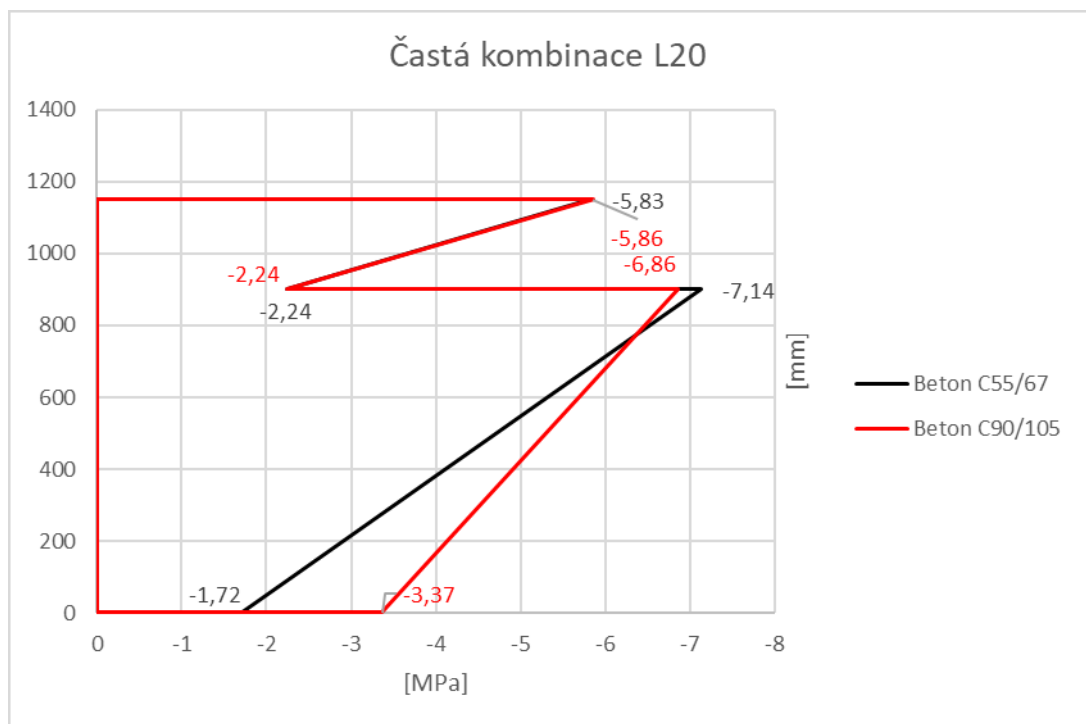
Obr. 5.11 - Napětí v průřezu v době vnesení předpětí $L=20\text{ m}$



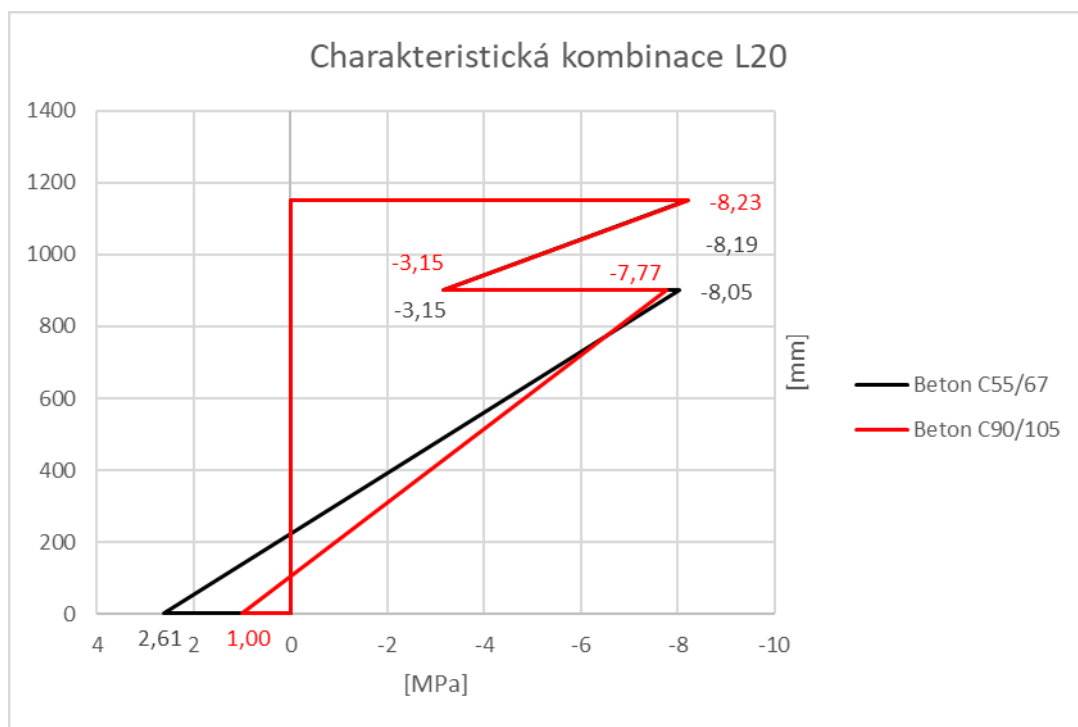
Obr. 5.12 - Napětí v průřezu v době betonáže desky $L=20\text{ m}$



Obr. 5.13 - Napětí v průřezu kvazistálá kombinace $L=20\text{ m}$



Obr. 5.14 - Napětí v průřezu častá kombinace $L=20\text{ m}$

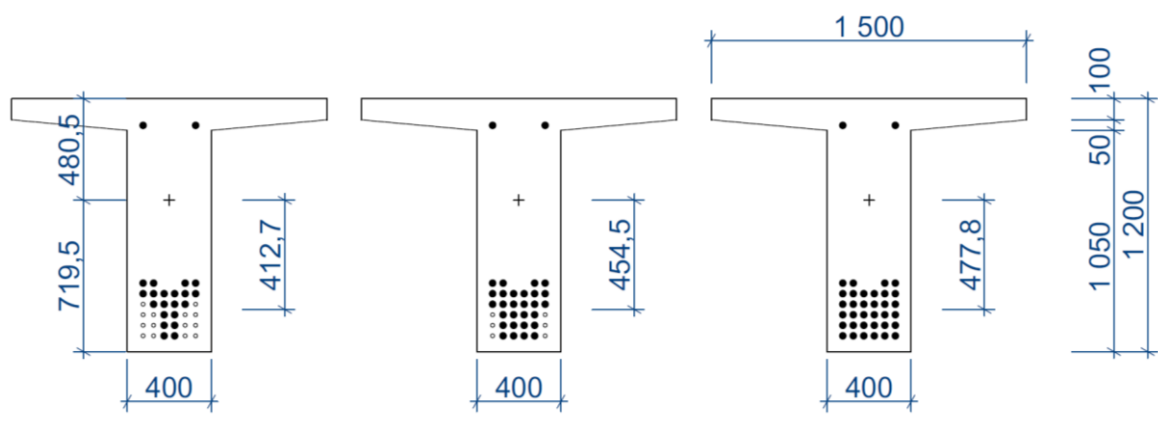


Obr. 5.15 - Napětí v průřezu charakteristická kombinace $L=20$ m

6 Návrh a posouzení nosníku $L=25$ m

Pro rozpětí 25 metrů byl navržen nosník výšky 1200 mm. Šířka nosníku je 400 mm. Šířka horní příruby je 1500 mm. V pozdějších stádiích bude nosník spřažen s monolitickou deskou tloušťky 250 mm.

Pro rozpětí 25 m bylo navrženo 36 předem předpjatých lan. Z toho 34 u dolního okraje a dvě u horního okraje nosníku. Lana jsou separována dle následujícího obrázku. Separace je provedena symetricky z obou stran. Můžeme vidět 3 řezy nosníkem. První pro začátek nosníku, tj. do vzdálenosti $x=2$ m. V této vzdálenosti působí 22 lan. Druhý řez je pro vzdálenost 2 až 4 metry. V tomto řezu působí 30 lan. V posledním řezu pro vzdálenost 4 až 11 metrů působí všechna lana. Pro výpočet byla skupina lan nahrazena jedním lanem v těžišti předpínací výztuže. Na obrázku vidíme vzdálenost těžiště betonu od vzdálenosti těžiště předpínací výztuže. Lana jsou umístěna i separována symetricky.



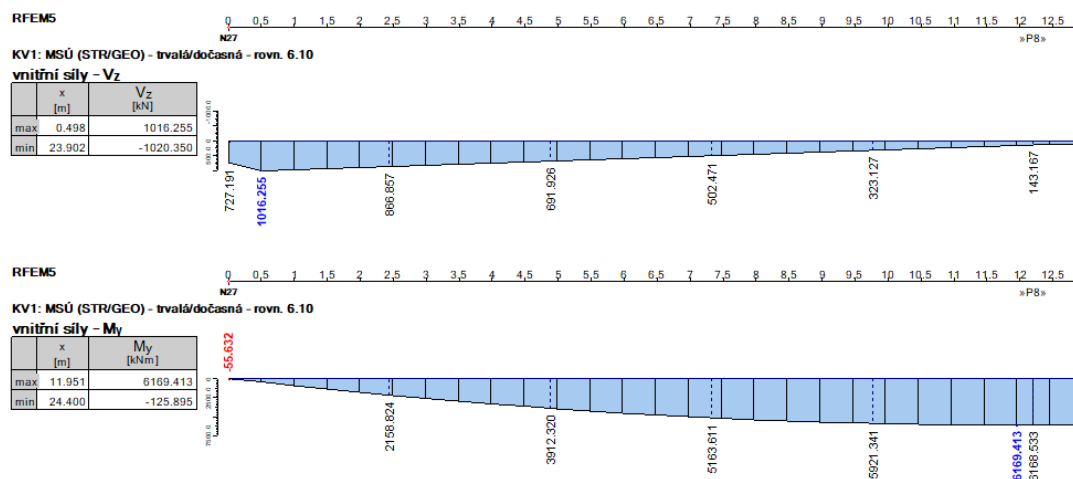
Obr. 6.1 - Schéma vyztužení nosníku pro $L=25$ m

6.1 Beton C55/67

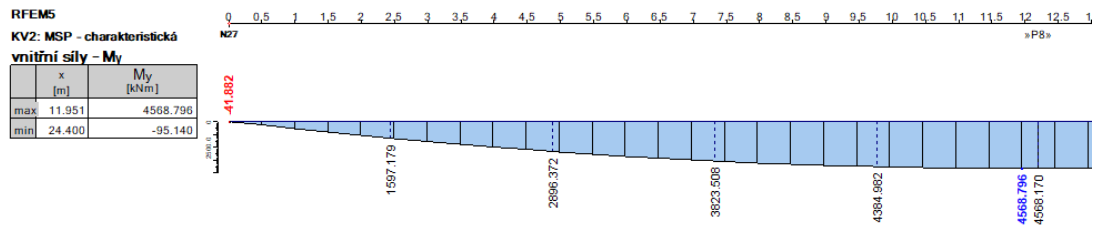
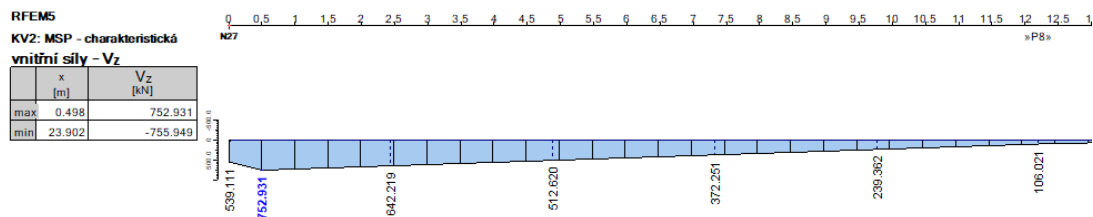
Postup výpočtu byl proveden dle kapitoly 3. Kvůli velkému množství výpočtů budou výsledky zobrazeny v názorných tabulkách. Pro výpočet byly uvažovány materiálové charakteristiky dle Tab. 3.1, Tab. 3.2 a Tab. 3.4.

6.1.1 Vnitřní síly

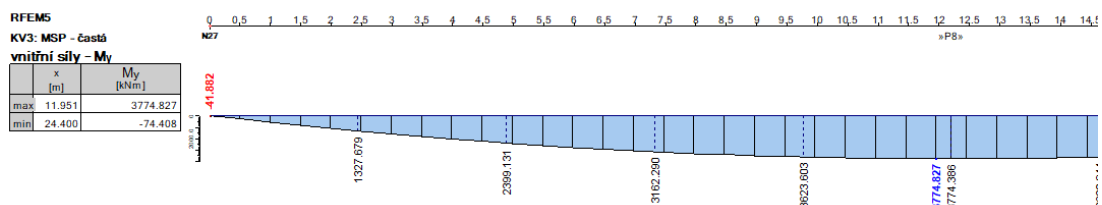
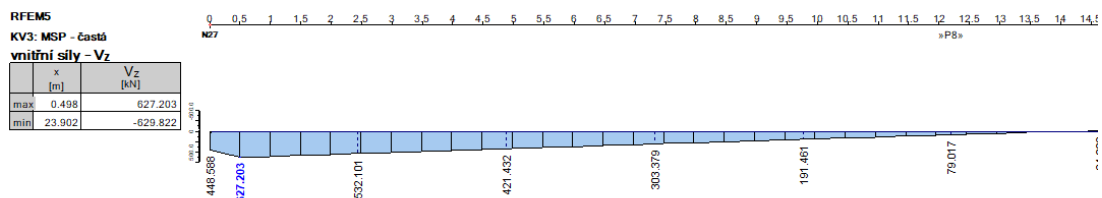
Jelikož se jedná o prostý nosník a výsledky jsou téměř symetrické, vnitřní síly jsou zobrazeny pro $\frac{1}{2}$ rozpětí pro lepší čitelnost. Výsledky jsou zobrazeny pro nejvíce namáhaný nosník.



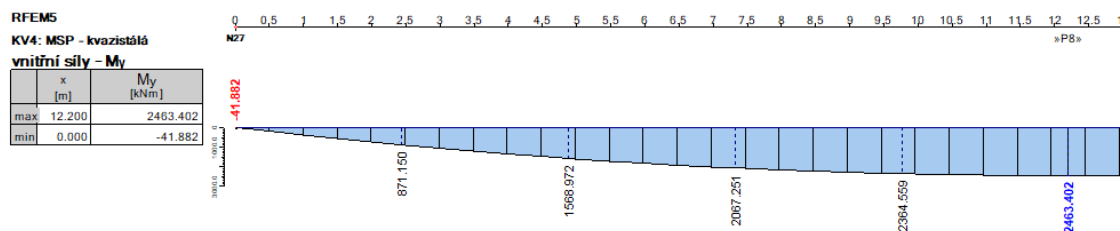
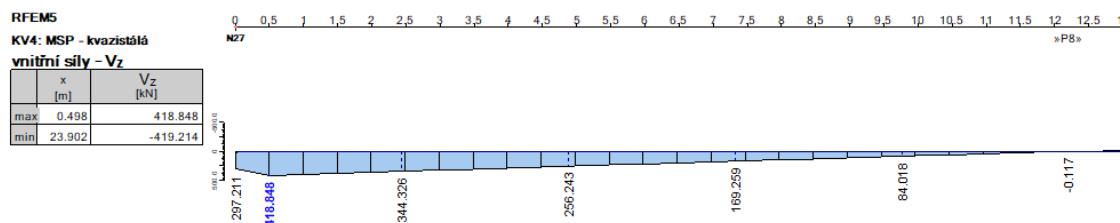
Obr. 6.2 - MSÚ-rovnice 6.10 L25, C55/67



Obr. 6.3 - MSP-charakteristická kombinace L25, C55/67



Obr. 6.4 - MSP-častá kombinace L25, C55/67



Obr. 6.5 - MSP-kvazistálá kombinace L25, C55/67

6.1.2 Ideální průřez

Výpočet ideálního průřezu byl proveden dle vzorců (3.12) až (3.19). V horní polovině tabulky se nachází výpočet pro nosník samostatný. V dolní polovině pro nosník společně s deskou.

Tab. 6.1 - Výpočet ideálního průřezu L25, C55/67

Vzdálenost [mm]:			lpt1+a	lpt1+2m+a	lpt1+4m+a	l/2
Počet prutů předpínací výztuže			22	30	36	36
Ideální průřez - T průřez	Ac	[mm ²]	617500,00	617500,00	617500,00	617500,00
	Ecm	[Mpa]	38000,00	38000,00	38000,00	38000,00
	agcd	[mm]	719,50	719,50	719,50	719,50
	Ic	[mm ⁴]	8,90E+10	8,90E+10	8,90E+10	8,90E+10
	Ap [mm ²]	[mm ²]	3300,00	4500,00	5400,00	5400,00
	Ep	[Mpa]	195000,00	195000,00	195000,00	195000,00
	ep	[mm]	412,68	454,50	477,83	477,83
	Ip	[mm ⁴]	65613,20	89472,54	107367,05	107367,05
	αE	[-]	5,13	5,13	5,13	5,13
	Ai	[mm ²]	634434,21	640592,11	645210,53	645210,53
	ti	[mm]	11,02	16,38	20,52	20,52
	agid	[mm]	708,48	703,12	698,98	698,98
	agih	[mm]	491,52	496,88	501,02	501,02
	Ii	[mm ⁴]	9,18E+10	9,36E+10	9,51E+10	9,51E+10
	ei	[mm]	401,67	438,12	457,31	457,31
Ideální průřez - T průřez společně s deskou	Ac		992500,00	992500,00	992500,00	992500,00
	agcd		948,28	948,28	948,28	948,28
	Ec		36110,83	36110,83	36110,83	36110,83
	Ic		1,76E+11	1,76E+11	1,76E+11	1,76E+11
	Ap [mm ²]	[mm ²]	3300,00	4500,00	5400,00	5400,00
	Ep	[Mpa]	195000,00	195000,00	195000,00	195000,00
	ep	[mm]	641,46	683,28	706,61	706,61
	Ip	[mm ⁴]	65613,20	89472,54	107367,05	107367,05
	αE	[-]	5,40	5,40	5,40	5,40
	Ai	[mm ²]	1010320,14	1016800,19	1021660,23	1021660,23
	ti	[mm]	11,31	16,33	20,17	20,17
	agid	[mm]	936,96	931,95	928,11	928,11
	agih	[mm]	513,04	518,05	521,89	521,89
	Ii	[mm ⁴]	1,84E+11	1,88E+11	1,91E+11	1,91E+11
	ei	[mm]	630,15	666,95	686,44	686,44

6.1.3 Kotvení předem předpjaté výztuže

Výpočet délky kotvení předem předpjaté výztuže byl proveden dle vzorců (3.20) až (3.22).

Tab. 6.2 - Výpočet délky kotvení předem předpjaté výztuže L25, C55/67

Délka přenosu síly l_{pt}	η_{p1}	[-]	3,20
	η_1	[-]	1,00
	$f_{ctm}(1den)$	[MPa]	3,15
	α_{ct}		1,00
	$f_{ctd}(1den)$	[MPa]	1,47
	f_{bpt}	[MPa]	4,70
	α_1	[-]	1,00
	α_2	[-]	0,19
	ϕ	[mm]	15,70
	σ_{pm0}	[MPa]	1394,00
	l_{pt}	[mm]	883,99
	l_{pt1}	[mm]	707,19
	l_{pt2}	[mm]	1060,79
	l_{dis}	[mm]	1303,78

6.1.4 Ztráty předpětí

Výpočet ztrát předpětí byl proveden dle vzorců (3.23) až (3.36). Výpočet dotvarování a smršťování viz příloha A5.

Tab. 6.3 - Výpočet krátkodobých ztrát L25, C55/67

Krátkodobé ztráty		
$\sigma_{p,max}$	[Mpa]	1488
$A_{p,1}$	[mm ²]	150
Ztráta pokluzem v kotvě		
w	[mm]	4,00
L	[m]	25,00
$\Delta\sigma_w$	[MPa]	31,20
Ztráta deformací výrobní dráhy		
w	[mm]	4,00
L	[m]	25,00
$\Delta\sigma_w$	[MPa]	31,20
Ztráta relaxací výztuže před vnesením předpětí		
Třída rel. Chování		2,00
$\sigma_{p,a}$	[MPa]	1425,60
ρ_{1000}	[%]	2,50
μ	[-]	0,77
Tmax	[°C]	40,00
Δt	[hod]	12,00
t_{eq}	[hod]	164,92
t1	[hod]	48,00
t	[hod]	200,92
$\Delta\sigma_{pr}$	[MPa]	18,99
Ztráta při tepelném ošetřování		
α_c	[1/K]	1,00E-05
Tmax	[°C]	40,00
T0	[°C]	20,00
$\Delta\sigma_{\theta}$	[MPa]	19,50
Ztráta okamžitou deformací betonu		
σ_p	[Mpa]	1387,11
P	[kN]	7490,41
σ_{cp}	[MPa]	-24,61
$\Delta\epsilon_{cp}$	[-]	0,00
$\Delta\sigma_{el}$	[MPa]	126,30
$\sigma_{p,a}$	[MPa]	1260,81
Relaxace		
$\sigma_{p,a}$	[MPa]	1425,60
ρ_{1000}	[%]	2,50
μ	[-]	0,77
t	[hod]	500000,00
$\Delta\sigma_{pr,57}$	[MPa]	74,70
$\Delta\sigma_{pr,28}$	[MPa]	23,46

Tab. 6.4 - Výpočet dlouhodobých ztrát L25, C55/67

Dlouhodobé ztráty			
Čas		28dní	100let
ϵ_{cs}	[-]	9,00E-05	6,41E-04
$\Delta\sigma_{pr}$	[MPa]	23,46	74,70
$\varphi(t,t_0)$		0,593	1,436
z_{cp}		477,83	477,83
σ_{cp}	[MPa]	-16,57	-13,68
$\Delta\sigma_p$	[MPa]	74,07	228,60
σ_p	[MPa]	1186,75	1032,21
P		6408,43	5573,96
Rekapitulace napětí			Předpokládané napětí
$\sigma_{p,a}$	[MPa]	1260,81	1264,8
$\sigma_{p,28}$	[MPa]	1186,75	-
$\sigma_{p,\infty}$	[MPa]	1032,21	1075,08

6.1.5 Mezní stav použitelnosti

V následující tabulce můžeme vidět posudky pro mezní stav použitelnosti. Nosník byl posouzen ve 3 časových intervalech. V době zavedení předpětí, kdy nosník působí samostatně. V tomto čase na nosník působí maximální předpínací síla a nosník je nejméně zatížen. Druhý časový interval byl uvažován v čase 28 dní při betonáži železobetonové desky (mostovky). Nosník působí samostatně. Zatížení uvažováno jako 1,2násobek vlastní tíhy desky a nosníku. Tímto bylo zohledněno montážní zatížení a tíha čerstvého betonu. Poslední časový interval na konci životnosti (100 let). Nosník působí společně s deskou. Uvažována kvazistálá, častá a charakteristická kombinace zatížení.

Posudky byly provedeny dle vzorců (3.30) až (3.37). Napětí v průřezu se vypočítá podle vzorců (3.10) a (3.11).

Tab. 6.5 - Posouzení nosníku-SLS L25, C55/67

Vzdálenost [mm]:		lpt1+a	lpt1+2m+a	lpt1+4m +a	l/2
		1007,19	3007,19	5007,19	12500
Počet prutů předpínací výztuže		22	30	36	36
Napětí v průřezu po uvolnění předpínací výztuže					
rsup	1,05				
Pa	[kN]	4160,68	5673,66	6808,39	6808,39
Mg0	[kNm]	193,99	530,91	803,62	1254,30
σd	[MPa]	-20,43	-23,54	-27,61	-24,22
σh	[MPa]	2,51	1,52	1,55	-0,75
Podmínka:		$ \sigma \leq \{0,7f_{ck}; f_{ctm}\}$		38,50	4,20 Vyhoví
Napětí v průřezu při betonáži desky					
rsup	1,05				
P,28	[kN]	3916,26	5340,36	6408,43	6408,43
1,2*Mg1	[kNm]	259,32	878,28	1388,88	2236,08
σd	[MPa]	-17,23	-20,61	-22,84	-16,61
σh	[MPa]	0,97	-0,37	-1,53	-6,00
Podmínka:		$ \sigma \leq \{0,45f_{ck}; f_{ctm}\}$		24,75	4,20 Vyhoví
Napětí v průřezu kvazistálá kombinace					
rinf	0,95				
P,∞	[kN]	3406,31	4644,96	5573,96	5573,96
Mg1	[kNm]	216,10	731,90	1157,40	1863,40
Mkv	[kNm]	277,00	979,30	1543,60	2463,40
σd	[MPa]	-13,15	-14,68	-15,62	-9,39
σh	[MPa]	0,61	-0,86	-2,09	-6,12
σh´	[MPa]	-0,09	-0,35	-0,55	-0,86
σh2	[MPa]	-0,17	-0,68	-1,06	-1,64
Podmínka:		$ \sigma \leq \{0,45f_{ck}; f_{ctm}\}$		24,75	13,50 Vyhoví
Napětí v průřezu častá kombinace					
rinf	0,95				
P,∞	[kN]	3406,31	4644,96	5573,96	5573,96
Mg1	[kNm]	216,10	731,90	1157,40	1863,40
Mč	[kNm]	424,50	1490,70	2359,80	3774,80
σd	[MPa]	-12,40	-12,14	-11,65	-3,01
σh	[MPa]	0,40	-1,60	-3,26	-7,99
σh´	[MPa]	-0,30	-1,08	-1,71	-2,73
σh2	[MPa]	-0,58	-2,10	-3,29	-5,23
Podmínka:		Dekomprese Výztuž v tlačené oblasti x>100		790,74	Vyhoví
Napětí v průřezu charakteristická kombinace					
rinf	0,95				
P,∞	[kN]	3406,31	4644,96	5573,96	5573,96
Mg1	[kNm]	216,10	731,90	1157,40	1863,40
Mch	[kNm]	507,50	1794,20	2848,50	4568,80
σd	[MPa]	-11,98	-10,64	-9,27	0,86
σh	[MPa]	0,28	-2,03	-3,96	-9,12
σh´	[MPa]	-0,42	-1,52	-2,41	-3,86
σh2	[MPa]	-0,81	-2,93	-4,63	-7,41
Podmínka:		$ \sigma \leq \{0,6f_{ck}; f_{ctm}\}$		33,00	18,00
				Vyhoví	
Napětí v předpínací výztuži					
		σp	<	0,75 fpk	
σp,a	[Mpa]	1260,81	<	1395	Vyhoví
σp,28	[Mpa]	1186,75	<	1395	Vyhoví
σp,∞	[Mpa]	1032,21	<	1395	Vyhoví

6.1.6 Mezní stav únosnosti

Posudky na mezní stav únosnosti byly provedeny dle vzorců (3.41) až (3.49).

Tab. 6.6 - Posouzení nosníku na ohyb L25, C55/67

Metoda mezní rovnováhy	fcd	[MPa]	17,00
	ϵ_{cu3}	[-]	0,00
	fpd	[MPa]	1426,09
	Ep	[MPa]	195000,00
	Ap	[mm ²]	5400,00
	$\Delta\sigma_p$	[MPa]	165,27
	ΔF_p	[kN]	892,48
	P	[kN]	6808,39
	Fc	[kN]	7700,87
	d	[mm]	1208,33
	b	[mm]	1500,00
	η	[-]	0,98
	λ	[-]	0,79
	x	[mm]	393,32
	ξ_{bal}	[-]	0,81
	x _{lim}	[mm]	972,77
	z _p	[mm]	706,61
	z _c	[mm]	344,39
	M _{rd}	[kNm]	8093,66
	M _{ed}	[kNm]	6169,4
	M _{rd} >M _{ed}		Vyhoví

Tab. 6.7 - Posouzení nosníku na smyk L25, C55/67

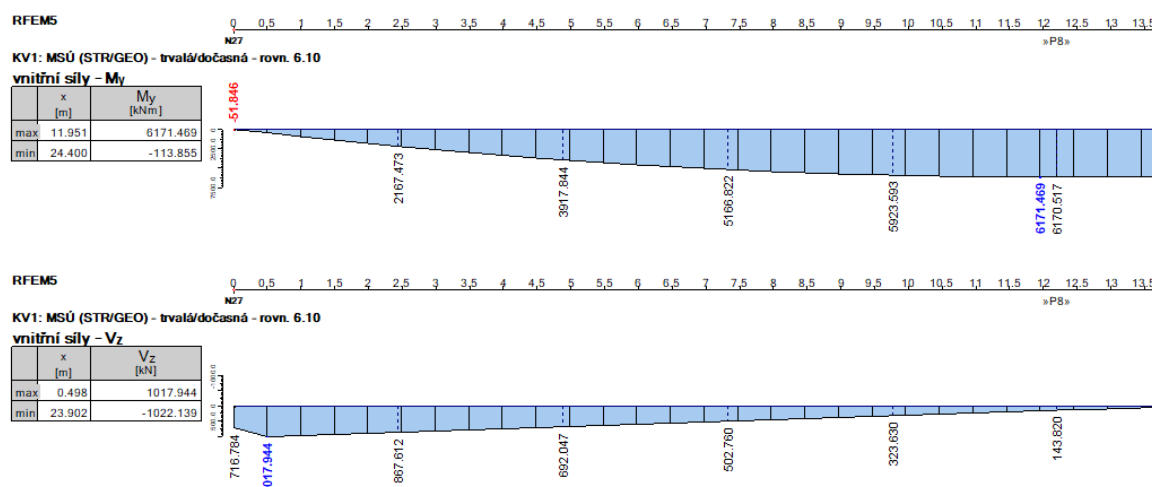
Únosnost ve smyku se smykovou výztuží	ϕ_{sw}	[mm]	12,00
	N _{sw}	[-]	2,00
	A _{sw}	[mm ²]	226,19
	s	[mm]	100,00
	z	[mm]	1087,50
	f _{ywd}	[MPa]	434,78
	θ	[°]	45,00
	V _{rd,s}	[kN]	1069,51
	σ_{cp}	[MPa]	11,03
	α_{cw}	[-]	1,25
	v _{1>0,5}	[-]	0,60
	v ₁	[-]	0,60
	b _w	[mm]	400,00
	V _{rd,max}	[kN]	5084,06
	V _{ed,(x=lpt2)}	[kN]	982,53
	V _{rd} >V _{ed}		Vyhoví

6.2 C90/105

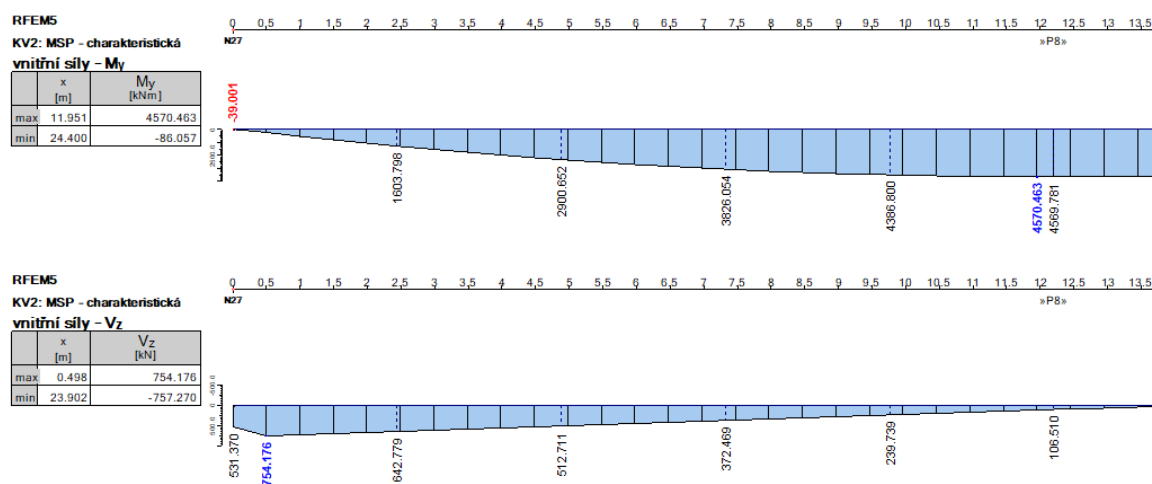
Postup výpočtu byl proveden dle kapitoly 3. Kvůli velkému množství výpočtů budou výsledky zobrazeny v názorných tabulkách. Pro výpočet byly uvažovány materiálové charakteristiky dle Tab. 3.1, Tab. 3.3 a Tab. 3.4.

6.2.1 Vnitřní síly

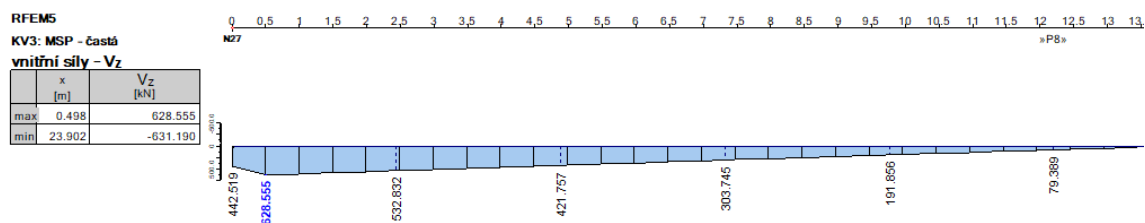
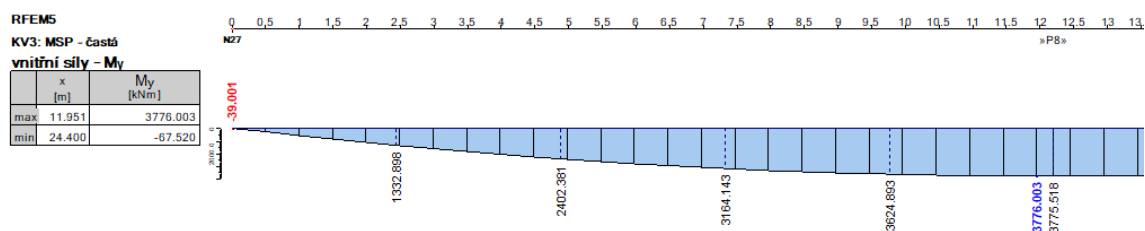
Jelikož se jedná o prostý nosník a výsledky jsou téměř symetrické, vnitřní síly jsou zobrazeny pro $\frac{1}{2}$ rozpětí pro lepší čitelnost. Výsledky jsou zobrazeny pro nejvíce namáhaný nosník.



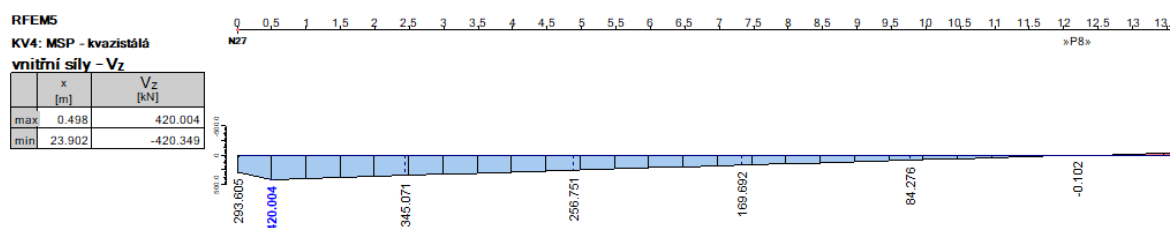
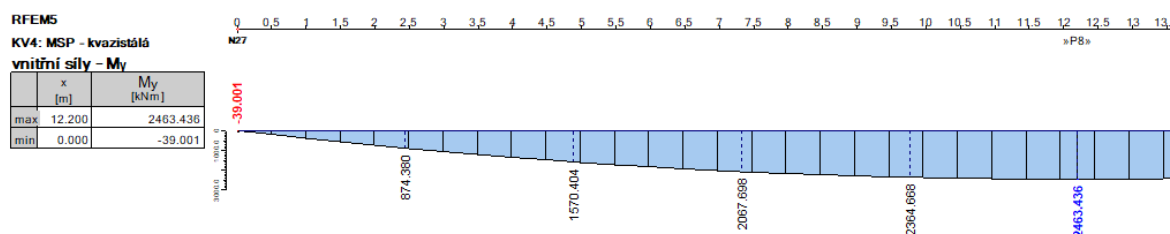
Obr. 6.6 - MSÚ-rovnice 6.10 L25, C90/105



Obr. 6.7 - MSP-charakteristická kombinace L25, C90/105



Obr. 6.8 - MSP-častá kombinace L25, C90/105



Obr. 6.9 - MSP-kvazistálá kombinace L25, C90/105

6.2.2 Ideální průřez

Výpočet ideálního průřezu byl proveden dle vzorců (3.12) až (3.19). V horní polovině tabulky se nachází výpočet pro nosník samostatný. V dolní polovině pro nosník společně s deskou.

Tab. 6.8 - Výpočet ideálního průřezu L25, C90/105

Vzdálenost [mm]:			lpt1+a	lpt1+2m+a	lpt1+4m+a	l/2
			894,04	2894,04	4894,04	12500
Počet prutů předpínací výztuže			22	30	36	36
Ideální průřez - T průřez	Ac	[mm ²]	617500,00	617500,00	617500,00	617500,00
	Ecm	[Mpa]	44000,00	44000,00	44000,00	44000,00
	agcd	[mm]	719,50	719,50	719,50	719,50
	Ic	[mm ⁴]	8,90E+10	8,90E+10	8,90E+10	8,90E+10
	Ap [mm ²]	[mm ²]	3300,00	4500,00	5400,00	5400,00
	Ep	[Mpa]	195000,00	195000,00	195000,00	195000,00
	ep	[mm]	412,68	454,50	477,83	477,83
	Ip	[mm ⁴]	65613,20	89472,54	107367,05	107367,05
	αE	[-]	4,43	4,43	4,43	4,43
	Ai	[mm ²]	632125,00	637443,18	641431,82	641431,82
	ti	[mm]	9,55	14,22	17,83	17,83
	agid	[mm]	709,95	705,28	701,67	701,67
	agih	[mm]	490,05	494,72	498,33	498,33
	Ii	[mm ⁴]	9,14E+10	9,30E+10	9,43E+10	9,43E+10
	ei	[mm]	403,13	440,28	460,01	460,01
Ideální průřez - T průřez společně s deskou	Ac		992500,00	992500,00	992500,00	992500,00
	agcd		948,28	948,28	948,28	948,28
	Ec		39843,83	39843,83	39843,83	39843,83
	Ic		1,76E+11	1,76E+11	1,76E+11	1,76E+11
	Ap [mm ²]	[mm ²]	3300,00	4500,00	5400,00	5400,00
	Ep	[Mpa]	195000,00	195000,00	195000,00	195000,00
	ep	[mm]	641,46	683,28	706,61	706,61
	Ip	[mm ⁴]	65613,20	89472,54	107367,05	107367,05
	αE	[-]	4,89	4,89	4,89	4,89
	Ai	[mm ²]	1008650,56	1014523,49	1018928,18	1018928,18
	ti	[mm]	10,27	14,83	18,33	18,33
	agid	[mm]	938,01	933,45	929,95	929,95
	agih	[mm]	511,99	516,55	520,05	520,05
	Ii	[mm ⁴]	1,83E+11	1,87E+11	1,89E+11	1,89E+11
	ei	[mm]	631,19	668,45	688,28	688,28

6.2.3 Kotvení předem předpjaté výztuže

Tab. 6.9 - Výpočet délky kotvení předem předpjaté výztuže L25, C90/105

Délka přenosu síly lpt	ηp1	[-]	3,20
	η1	[-]	1,00
	fctm(1den)	[MPa]	3,75
	αct		1,00
	fctd(1den)	[MPa]	1,75
	fbpt	[MPa]	5,60
	α1	[-]	1,00
	α2	[-]	0,19
	φ	[mm]	15,70
	σpm0	[MPa]	1394,00
	lpt	[mm]	742,55
	lpt1	[mm]	594,04
	lpt2	[mm]	891,06
	ldis	[mm]	1212,35

6.2.4 Ztráty předpětí

Výpočet ztrát předpětí byl proveden dle vzorců (3.23) až (3.36). Výpočet dotvarování a smršťování viz příloha A6.

Tab. 6.10 - Výpočet krátkodobých ztrát L25, C90/105

Krátkodobé ztráty		
$\sigma_{p,max}$	[Mpa]	1488
$A_{p,1}$	[mm ²]	150
Ztráta pokluzem v kotvě		
w	[mm]	4,00
L	[m]	25,00
$\Delta\sigma,w$	[MPa]	31,20
Ztráta deformací výrobní dráhy		
w	[mm]	4,00
L	[m]	25,00
$\Delta\sigma,w$	[MPa]	31,20
Ztráta relaxací výztuže před vnesením předpětí		
Třída rel. Chování		2,00
$\sigma_{p,a}$	[MPa]	1425,60
ρ_{1000}	[%]	2,50
μ	[-]	0,77
Tmax	[°C]	40,00
Δt	[hod]	12,00
t_{eq}	[hod]	164,92
t_1	[hod]	48,00
t	[hod]	200,92
$\Delta\sigma,pr$	[MPa]	18,99
Ztráta při tepelném ošetřování		
α_c	[1/K]	1,00E-05
Tmax	[°C]	40,00
T0	[°C]	20,00
$\Delta\sigma,\theta$	[MPa]	19,50
Ztráta okamžitou deformací betonu		
σ_p	[Mpa]	1387,11
P	[kN]	7490,41
σ_{cp}	[MPa]	-24,61
$\Delta\epsilon_{cp}$	[-]	0,00
$\Delta\sigma,el$	[MPa]	109,08
$\sigma_{p,a}$	[MPa]	1278,04
Relaxace		
$\sigma_{p,a}$	[MPa]	1425,60
ρ_{1000}	[%]	2,50
μ	[-]	0,77
t	[hod]	500000,00
$\Delta\sigma,pr,57$	[MPa]	74,70
$\Delta\sigma,pr,28$	[MPa]	23,46

Tab. 6.11 - Výpočet dlouhodobých ztrát L25, C90/105

Dlouhodobé ztráty			
Čas		28dní	100let
ϵ_{cs}	[-]	1,50E-04	4,81E-04
$\Delta\sigma_{pr}$	[MPa]	23,46	74,70
$\varphi(t,t_0)$		0,515	1,045
z_{cp}		477,83	477,83
σ_{cp}	[MPa]	-17,16	-14,23
$\Delta\sigma_p$	[MPa]	76,39	185,37
σ_p	[MPa]	1201,65	1092,66
P		6488,89	5900,38
Rekapitulace napětí		Předpokládané napětí	
$\sigma_{p,a}$	[MPa]	1278,04	1264,8
$\sigma_{p,28}$	[MPa]	1201,65	-
$\sigma_{p,\infty}$	[MPa]	1092,66	1075,08

6.2.5 Mezní stav použitelnosti

V následující tabulce můžeme vidět posudky pro mezní stav použitelnosti. Nosník byl posouzen ve 3 časových intervalech. V době zavedení předpětí, kdy nosník působí samostatně. V tomto čase na nosník působí maximální předpínací síla a nosník je nejméně zatížen. Druhý časový interval byl uvažován v čase 28 dní při betonáži železobetonové desky (mostovky). Nosník působí samostatně. Zatížení uvažováno jako 1,2násobek vlastní tíhy desky a nosníku. Tímto bylo zohledněno montážní zatížení a tíha čerstvého betonu. Poslední časový interval na konci životnosti (100 let). Nosník působí společně s deskou. Uvažována kvazistálá, častá a charakteristická kombinace zatížení.

Posudky byly provedeny dle vzorců (3.30) až (3.37). Napětí v průřezu se vypočítá podle vzorců (3.10) a (3.11).

Tab. 6.12 - Posouzení nosníku-SLS L25, C90/105

Vzdálenost [mm]:		lpt1+a	lpt1+2m+a	lpt1+4m +a	l/2
		894,04	2894,04	4894,04	12500
Počet prutů předpínací výztuže		22	30	36	36
Napětí v průřezu po uvolnění předpínací výztuže					
rsup	1,05				
Pa	[kN]	4217,52	5751,16	6901,39	6901,39
Mg0	[kNm]	173,01	513,56	789,90	1254,30
σd	[MPa]	-20,87	-24,33	-28,58	-25,05
σh	[MPa]	2,56	1,72	1,78	-0,61
Podmínka:		$ \sigma \leq \{0,7f_{ck}; f_{ctm}\}$		63,00	5,00 Vyhoví
Napětí v průřezu při betonáži desky					
rsup	1,05				
P,28	[kN]	3965,43	5407,40	6488,89	6488,89
1,2*Mg1	[kNm]	301,68	909,00	1413,96	2234,76
σd	[MPa]	-17,28	-20,97	-23,43	-17,32
σh	[MPa]	0,79	-0,44	-1,53	-5,87
Podmínka:		$ \sigma \leq \{0,45f_{ck}; f_{ctm}\}$		40,50	5,00 Vyhoví
Napětí v průřezu kvazistálá kombinace					
rinf	0,95				
P,∞	[kN]	3605,79	4916,98	5900,38	5900,38
Mg1	[kNm]	251,40	757,50	1178,30	1862,30
Mkv	[kNm]	326,90	1018,50	1573,90	2463,40
σd	[MPa]	-13,80	-15,87	-17,22	-11,12
σh	[MPa]	0,53	-0,79	-1,90	-5,81
σh´	[MPa]	-0,11	-0,37	-0,56	-0,86
σh2	[MPa]	-0,21	-0,72	-1,09	-1,65
Podmínka:		$ \sigma \leq \{0,45f_{ck}; f_{ctm}\}$		40,50	13,50 Vyhoví
Napětí v průřezu častá kombinace					
rinf	0,95				
P,∞	[kN]	3605,79	4916,98	5900,38	5900,38
Mg1	[kNm]	251,40	757,50	1178,30	1862,30
Mč	[kNm]	496,20	1550,10	2407,80	3776,10
σd	[MPa]	-12,93	-13,21	-13,12	-4,67
σh	[MPa]	0,28	-1,55	-3,09	-7,68
σh´	[MPa]	-0,35	-1,13	-1,75	-2,73
σh2	[MPa]	-0,68	-2,19	-3,38	-5,26
Podmínka:		Dekomprese Výztuž v tlačené oblasti x>100		1928,45	Vyhoví
Napětí v průřezu charakteristická kombinace					
rinf	0,95				
P,∞	[kN]	3605,79	4916,98	5900,38	5900,38
Mg1	[kNm]	251,40	757,50	1178,30	1862,30
Mch	[kNm]	594,10	1866,20	2907,30	4570,50
σd	[MPa]	-12,43	-11,63	-10,67	-0,77
σh	[MPa]	0,14	-2,00	-3,80	-8,82
σh´	[MPa]	-0,49	-1,58	-2,47	-3,86
σh2	[MPa]	-0,96	-3,07	-4,75	-7,44
Podmínka:		$ \sigma \leq \{0,6f_{ck}; f_{ctm}\}$		54,00	18,00 5,00
				Vyhoví	
Napětí v předpínací výztuži					
		σp	<	0,75 fpk	
σp,a	[Mpa]	1278,04	<	1395	Vyhoví
σp,28	[Mpa]	1201,65	<	1395	Vyhoví
σp,∞	[Mpa]	1092,66	<	1395	Vyhoví

6.2.6 Mezní stav použitelnosti

Posudky na mezní stav únosnosti byly provedeny dle vzorců (3.41) až (3.49).

Tab. 6.13 - Posouzení nosníku na ohyb L25, C90/105

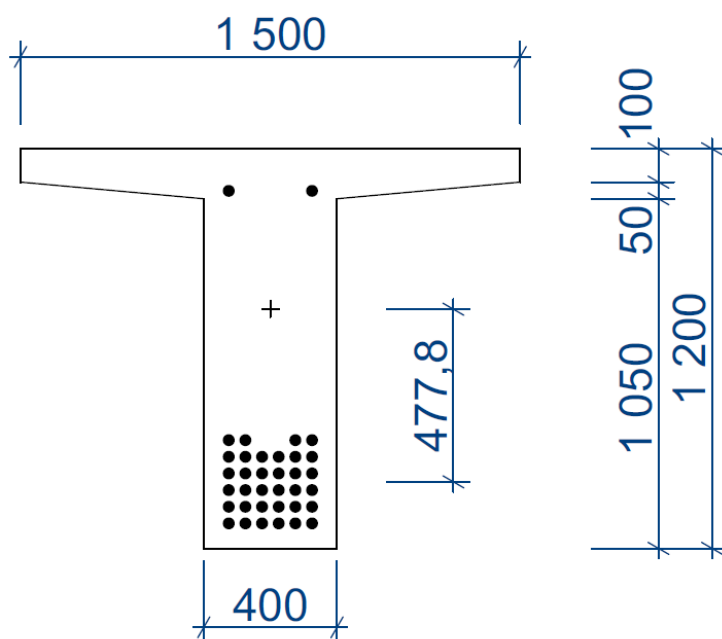
Metoda mezní rovnováhy	fcd	[MPa]	17,00
	ϵ_{cu3}	[-]	0,0035
	f _{pd}	[MPa]	1426,09
	E _p	[MPa]	195000,00
	A _p	[mm ²]	5400,00
	$\Delta\sigma_p$	[MPa]	148,05
	ΔF_p	[kN]	799,48
	P	[kN]	6901,39
	F _c	[kN]	7700,87
	d	[mm]	1208,33
	b	[mm]	1500,00
	η	[-]	0,80
	λ	[-]	0,70
	x	[mm]	539,28
	ξ_{bal}	[-]	0,82
	x _{lim}	[mm]	992,94
	z _p	[mm]	706,61
	z _c	[mm]	286,01
	M _{rd}	[kNm]	7644,06
	M _{ed}	[kNm]	6171,5
	M _{rd} >M _{ed}		Vyhoví

Tab. 6.14 - Posouzení nosníku na smyk L25, C90/105

Únosnost ve smyku se smykovou výztuží	ϕ_{sw}	[mm]	12,00
	N _{sw}	[-]	2,00
	A _{sw}	[mm ²]	226,19
	s	[mm]	100,00
	z	[mm]	1087,50
	f _{ywd}	[MPa]	434,78
	θ	[°]	45,00
	V _{rd,s}	[kN]	1069,51
	σ_{cp}	[MPa]	11,18
	α_{cw}	[-]	1,22
	v _{1>0,5}	[-]	0,45
	v ₁	[-]	0,50
	b _w	[mm]	400,00
	V _{rd,max}	[kN]	6761,68
	V _{ed,(x=lpt2)}	[kN]	804,7
	V _{rd} >V _{ed}		Vyhoví

6.3 Srovnání nosníků pro rozpětí $L=25$ m

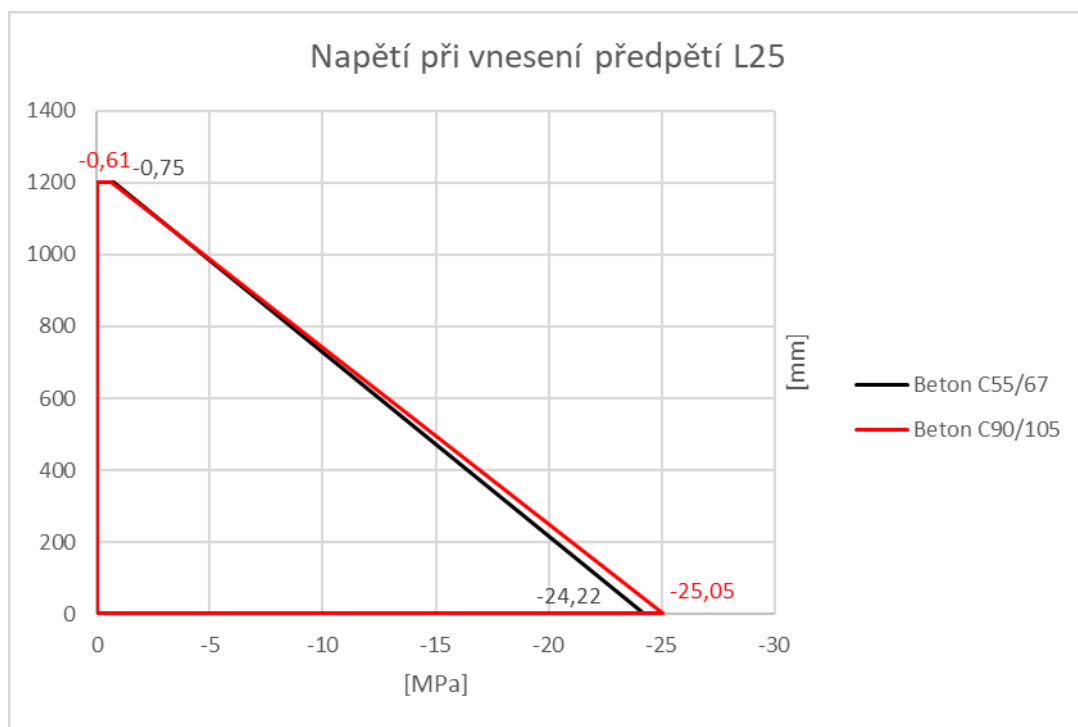
Nosníky budou srovnány z hlediska napětí v mezním stavu použitelnosti. Na následujících obrázcích Obr. 6.11 až Obr. 6.15 můžeme vidět srovnání napětí v průřezu uprostřed nosníku. Nosníky jsou stejných rozměrů a stejně zatíženy. Rozdíl v napětí je dán především ztrátami napětí v předpínací výztuži. Pro beton C55/67 jsou větší ztráty dány především větším dotvarováním betonu. Z tohoto důvodu je v předpínací výztuži menší napětí viz Tab. 6.15. Z tohoto důvodu je tlakové napětí na spodní straně průřezu vždy menší než u betonu C90/105. Při charakteristické kombinaci se pro beton C55/67 průřez na dolní straně dostává do tažené oblasti, zatím co beton C90/105 je stále tlačný.



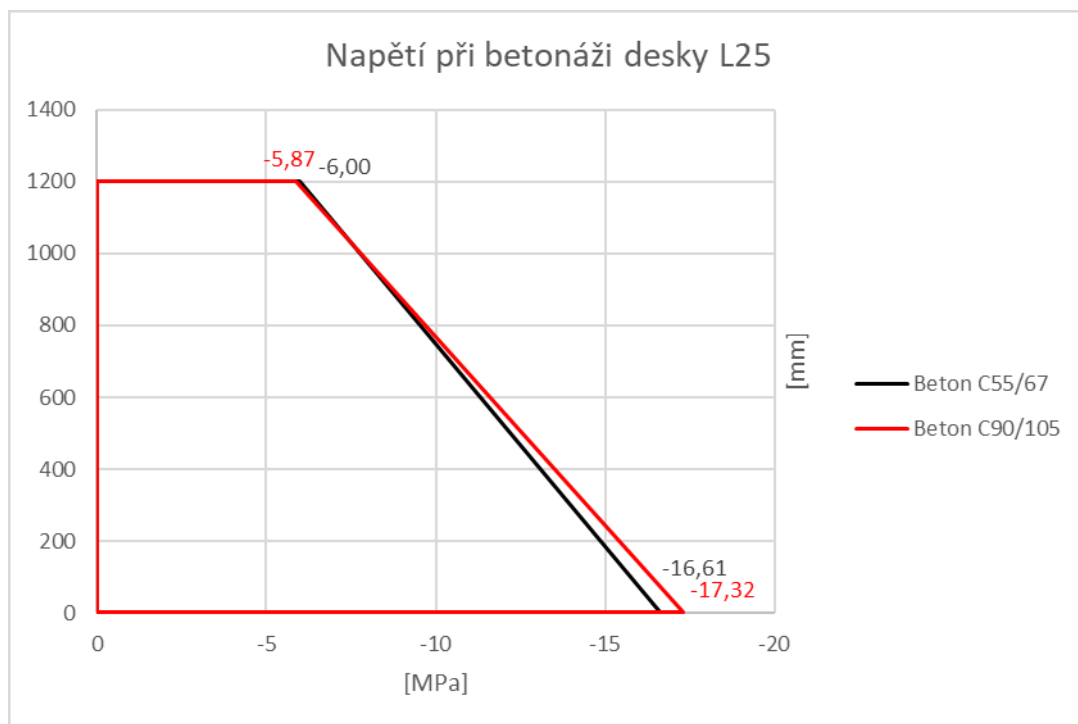
Obr. 6.10 - Předpětí uprostřed nosníku $L=25$ m

Tab. 6.15 - Srovnání napětí ve výztuži v čase t $L=25$ m

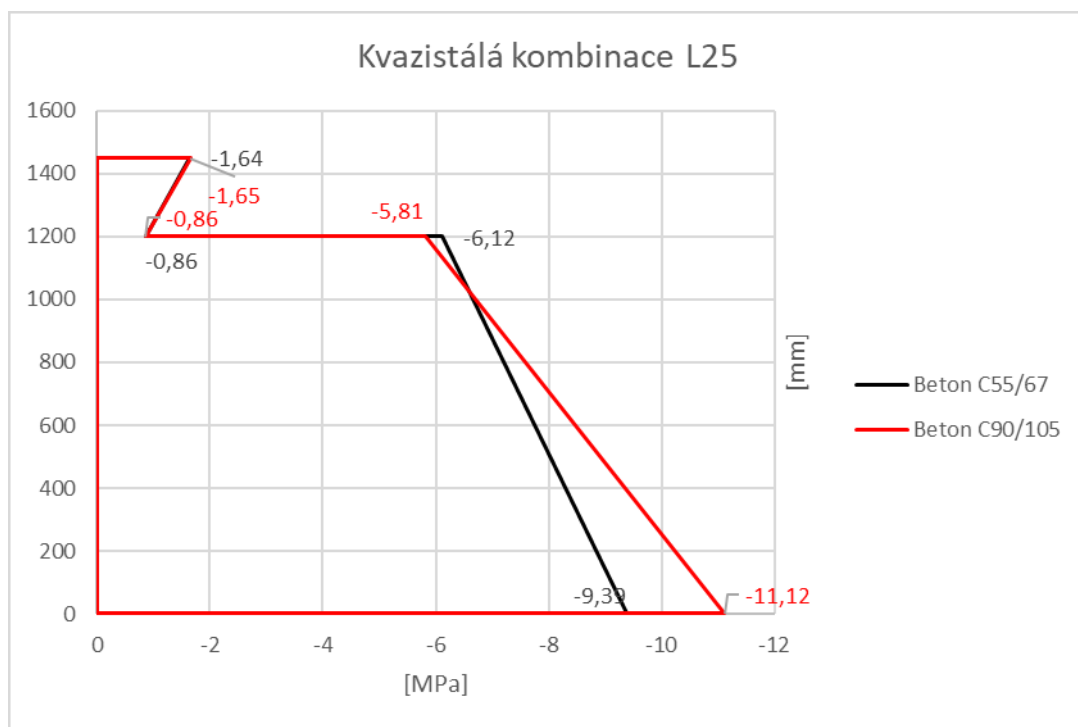
Napětí ve výztuži v čase t			
		C55/57	C90/105
$\sigma_{p,a}$	[MPa]	1260,813	1278,035
$\sigma_{p,28}$	[MPa]	1186,746	1201,645
$\sigma_{p,\infty}$	[MPa]	1032,214	1092,662



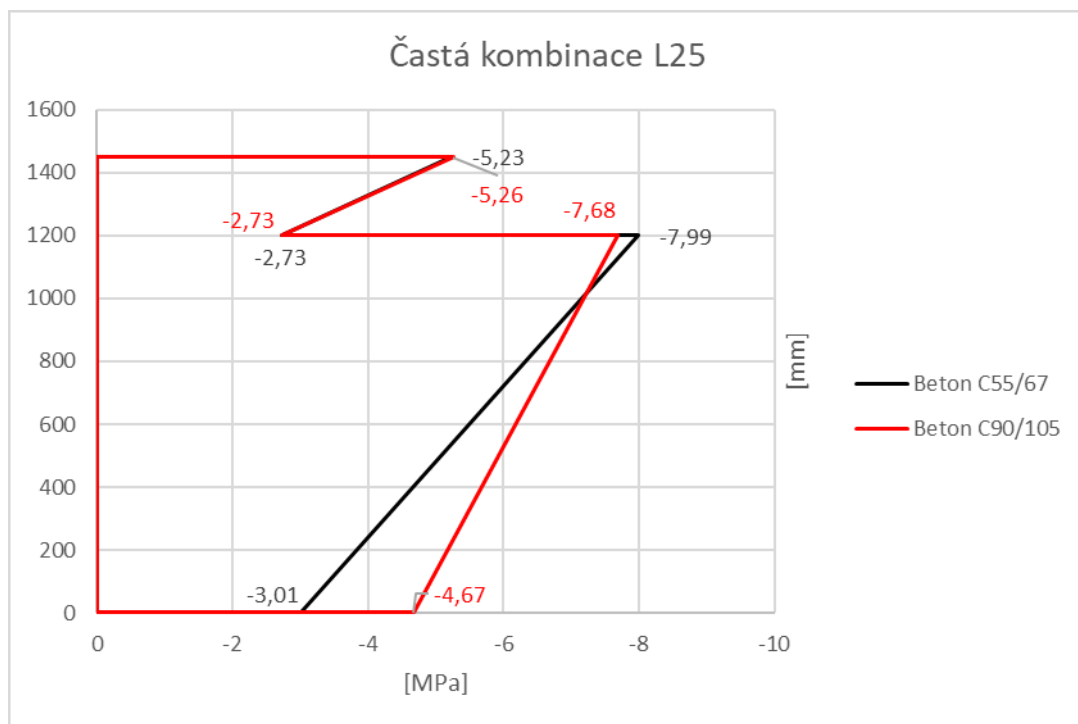
Obr. 6.11 – Napětí v průřezu v době vnesení předpětí $L=25\text{ m}$



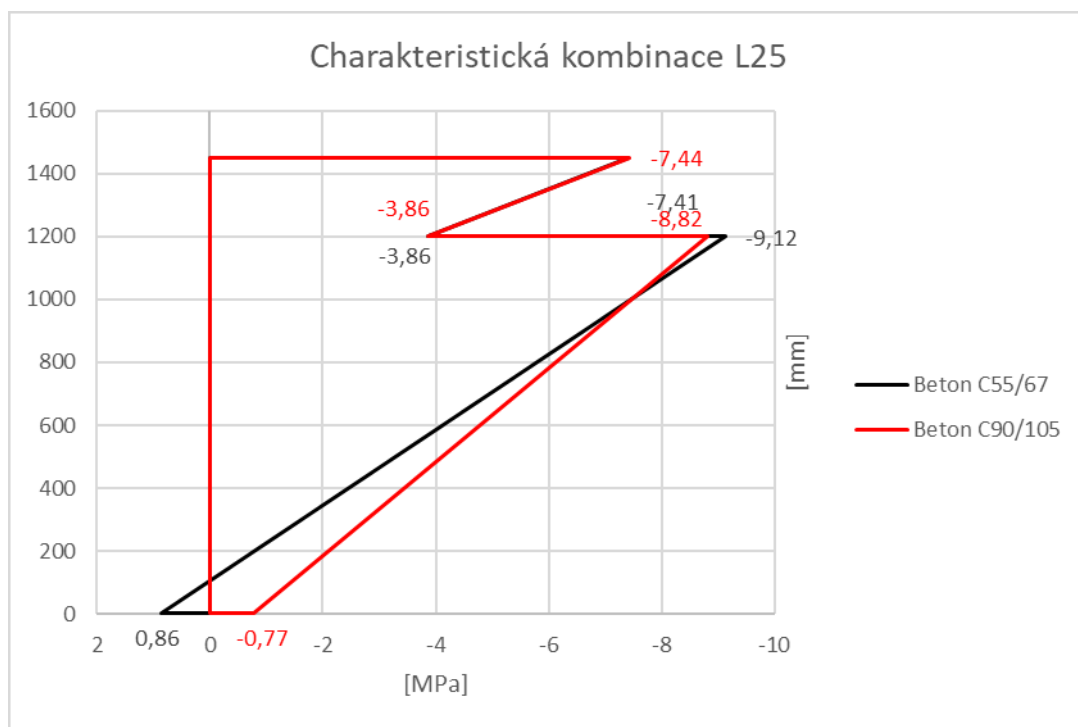
Obr. 6.12 - Napětí v průřezu v době betonáže desky $L=25\text{ m}$



Obr. 6.13 - Napětí v průřezu kvazistálá kombinace $L=25\text{ m}$



Obr. 6.14 - Napětí v průřezu častá kombinace $L=25\text{ m}$



Obr. 6.15 - Napětí v průřezu charakteristická kombinace $L=25\text{ m}$

7 Závěr

V rámci této diplomové práce byl proveden statický výpočet předem předpjatých mostních nosníků modelového mostního objektu. V první části byl proveden krátký popis modelového mostního objektu, výpočet zatížení a tvorba modelu. Ve druhé části byl popsán obecný postup výpočtu. V dalších částech byl proveden výpočet pro rozpětí mostu 15, 20 a 25 metrů. Nosníky byly navrženy pro beton C55/67 a následně byl výpočet přepočítán pro beton C90/105. Z tohoto hlediska se jeví návrh těchto nosníků z vysokopevnostního betonu značně neekonomický. Průřez nosníků pro vysokopevnostní beton by mohl být mnohem menší a vzhledem k lepším vlastnostem těchto betonů také více předepnut. Pro tento typ nosníků je vhodné užití vysokopevnostního betonu C90/105 pouze v případě, že bychom potřebovali razantně snížit konstrukční výšku nosné konstrukce. Ve výpočtech bylo uvažováno spolupůsobení desky s nosníkem, i když ve výpočtech chybí návrh spřahovací výztuže, proto pro další užití nosníku je potřeba navrhnout a posoudit tuto výztuž. Dále chybí posouzení únosnosti ve smyku křídel T-průřezu, které fungují jako ztracené bednění pro železobetonovou desku.

Součástí této diplomové práce je taktéž výkresová dokumentace, která se nachází v přílohách. Byly vypracovány výkresy tvaru, výkresy předpínací výztuže a výkresy betonářské výztuže.

Vypracování diplomové práce bylo pro autora velkým přínosem, protože si prohloubil zkušenosti s modelováním výpočetních modelů v programu Dlubal RFEM a také si prohloubil teoretické a praktické zkušenosti s navrhováním předpjatých konstrukcí.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucí mé diplomové práce Ing. Pavlíně Matečkové, Ph. D. za vstřícný přístup a cenné rady během vypracování této práce.

Seznam použité literatury

- [1] ČSN EN 1991-1-1 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-1: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb. ČNI, 2004.
- [2] ČSN EN 1991-2 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 2: Zatížení mostů dopravou. ČNI, 2005.
- [3] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. ČNI, 2011.
- [4] ČSN EN 1992-2 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 2: Betonové mosty – Navrhování a konstrukční zásady. ČNI, 2007
- [5] Dlubal RFEM 5.20. Komerční software. [online]. <https://www.dlubal.com/cs>.
- [6] ČSN EN 1990. Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí. ČNI, březen 2004.
- [7] AUTOCAD 2019. Komerční software. [online]. <https://www.autodesk.cz/>.
- [8] Navrátil, J.: Předpjaté betonové konstrukce, CERM s.r.o., Brno 2004.

Seznam obrázků a tabulek

Obrázky

Obr. 2.1 - Příčný řez mostu.....	15
Obr. 2.2 - Podepření levá strana mostu [5].....	16
Obr. 2.3 - Podepření pravá strana mostu [5].....	16
Obr. 2.4 - ZS 2-Ostatní stálé zatížení	17
Obr. 2.5 - Zatížení dopravou LM1-UDL	19
Obr. 2.6 - Zatížení dopravou LM1-TS	19
Obr. 2.7 - Zatížení dopravou LM1-TS	20
Obr. 3.1 - Přenášečí délky-schéma.....	27
Obr. 4.1 - Schéma vyztužení nosníků pro L=15 m	34
Obr. 4.2 - MSÚ-rovnice 6.10 L15, C55/67.....	35
Obr. 4.3 - MSP-charakteristická kombinace L15, C55/67	35
Obr. 4.4 - MSP-častá kombinace L15, C55/67	36
Obr. 4.5 - MSP-kvazistálá kombinace L15, C55/67	36
Obr. 4.6 - MSÚ-rovnice 6.10 L15, C90/105.....	43
Obr. 4.7 - MSP-charakteristická kombinace L15, C90/105	43
Obr. 4.8 - MSP-častá kombinace L15, C90/105	44

Obr. 4.9 - MSP-kvazistálá kombinace L15, C90/105	44
Obr. 4.10 - Předpětí uprostřed nosníku L=15 m	51
Obr. 4.11 - Napětí v průřezu v době vnesení předpětí L=15 m	52
Obr. 4.12 - Napětí v průřezu v době betonáže desky L=15 m	52
Obr. 4.13 - Napětí ve výztuži kvazistálá kombinace L=15 m	53
Obr. 4.14 - Napětí v průřezu častá kombinace L=15 m	53
Obr. 4.15 - Napětí v průřezu charakteristická kombinace L=15 m	54
Obr. 5.1 - Schéma vyztužení nosníku L=20 m	55
Obr. 5.2 - MSÚ-rovnice 6.10 L20, C55/67	55
Obr. 5.3 – MSP-charakteristická kombinace L20, C55/67	56
Obr. 5.4 - MSP-častá kombinace L20, C55/67	56
Obr. 5.5 - MSP-kvazistálá kombinace L20, C55/67	56
Obr. 5.6 - MSÚ-rovnice 6.10 L20, C90/105	63
Obr. 5.7 - MSP-charakteristická kombinace L20, C90/105	63
Obr. 5.8 - MSP-častá kombinace L20, C90/105	64
Obr. 5.9 - MSP-kvazistálá kombinace L20, C90/105	64
Obr. 5.10 – Předpětí uprostřed nosníku L=20 m	71
Obr. 5.11 - Napětí v průřezu v době vnesení předpětí L=20 m	72
Obr. 5.12 - Napětí v průřezu v době betonáže desky L=20 m	72
Obr. 5.13 - Napětí v průřezu kvazistálá kombinace L=20 m	73
Obr. 5.14 - Napětí v průřezu častá kombinace L=20 m	73
Obr. 5.15 - Napětí v průřezu charakteristická kombinace L=20 m	74
Obr. 6.1 - Schéma vyztužení nosníku pro L=25 m	75
Obr. 6.2 - MSÚ-rovnice 6.10 L25, C55/67	75
Obr. 6.3 - MSP-charakteristická kombinace L25, C55/67	76
Obr. 6.4 - MSP-častá kombinace L25, C55/67	76
Obr. 6.5 - MSP-kvazistálá kombinace L25, C55/67	76
Obr. 6.6 - MSÚ-rovnice 6.10 L25, C90/105	83
Obr. 6.7 - MSP-charakteristická kombinace L25, C90/105	83
Obr. 6.8 - MSP-častá kombinace L25, C90/105	84
Obr. 6.9 - MSP-kvazistálá kombinace L25, C90/105	84
Obr. 6.10 - Předpětí uprostřed nosníku L=25 m	90
Obr. 6.11 – Napětí v průřezu v době vnesení předpětí L=25 m	91
Obr. 6.12 - Napětí v průřezu v době betonáže desky L=25 m	91
Obr. 6.13 - Napětí v průřezu kvazistálá kombinace L=25 m	92

Obr. 6.14 - Napětí v průřezu častá kombinace $L=25$ m	92
Obr. 6.15 - Napětí v průřezu charakteristická kombinace $L=25$ m.....	93

Tabulky

Tab. 2.1 - Uvažované objemové tíhy	16
Tab. 2.2 - Ostatní stálé zatížení.....	17
Tab. 2.3 - Zatížení LM1.....	18
Tab. 2.4 - Kombinační součinitelé	21
Tab. 2.5 - Pevnostní třídy betonu	22
Tab. 2.6 - Pevnostní třídy předpínací výztuže	22
Tab. 3.1 - Návrhové pevnosti betonu C30/37	23
Tab. 3.2 - Návrhové pevnosti betonu C55/67	24
Tab. 3.3 - Návrhové pevnosti betonu C90/105	24
Tab. 3.4 - Předpínací výztuž Y1860 S7-15,7.....	25
Tab. 4.1 - Výpočet ideálního průřezu L15, C55/67	37
Tab. 4.2 - Výpočet délky kotvení předem předpjaté výztuže L15, C55/67.....	38
Tab. 4.3 - Výpočet krátkodobých ztrát L15, C55/67	39
Tab. 4.4 - Výpočet dlouhodobých ztrát L15, C55/67.....	40
Tab. 4.5 - Posouzení nosníku – SLS L15, C55/67	41
Tab. 4.6 - Posudek na ohyb L15, C55/67	42
Tab. 4.7 - Posudek na smyk L15, C55/67	42
Tab. 4.8 - Výpočet ideálního průřezu L15, C90/105	45
Tab. 4.9 - Výpočet délky kotvení předem předpjaté výztuže L15, C90/105.....	46
Tab. 4.10 - Výpočet krátkodobých ztrát L15, C90/105.....	47
Tab. 4.11 - Výpočet dlouhodobých ztrát L15, C90/105.....	48
Tab. 4.12 – Posouzení nosníku-SLS L15, C90/105	49
Tab. 4.13 - Posouzení nosníku na ohyb L15, C90/105	50
Tab. 4.14 - Posouzení nosníku smyk L15, C90/105	50
Tab. 4.15 - Srovnání napětí ve výztuži v čase t $L=15$ m	51
Tab. 5.1 - Výpočet ideálního průřezu.....	57
Tab. 5.2 - Výpočet délky kotvení předem předpjaté výztuže L20, C55/67.....	58
Tab. 5.3 - Krátkodobé ztráty předpětí L20, C55/67	59
Tab. 5.4 - Dlouhodobé ztráty L20, C55/67.....	60
Tab. 5.5 - Posouzení nosníku-SLS L20, C55/67.....	61

Tab. 5.6 - Posouzení nosníku na ohyb L20, C55/67	62
Tab. 5.7 - Posouzení nosníku na smyk L20, C55/67	62
Tab. 5.8 - Výpočet ideálního průřezu L20, C90/105	65
Tab. 5.9 - Výpočet délky kotvení předem předpjaté výztuže L20, C90/105	66
Tab. 5.10 - Výpočet krátkodobých ztrát L20, C90/105	67
Tab. 5.11 - Výpočet dlouhodobých ztrát L20, C90/105	68
Tab. 5.12 - Posouzení nosníku-SLS L20, C90/105	69
Tab. 5.13 - Posouzení nosníku na ohyb L20, C90/105	70
Tab. 5.14 - Posouzení nosníku na smyk L20, C90/105	70
Tab. 5.15 - Srovnání napětí ve výztuži v čase t L=20 m	71
Tab. 6.1 - Výpočet ideálního průřezu L25, C55/67	77
Tab. 6.2 - Výpočet délky kotvení předem předpjaté výztuže L25, C55/67	78
Tab. 6.3 - Výpočet krátkodobých ztrát L25, C55/67	79
Tab. 6.4 - Výpočet dlouhodobých ztrát L25, C55/67	80
Tab. 6.5 - Posouzení nosníku-SLS L25, C55/67	81
Tab. 6.6 - Posouzení nosníku na ohyb L25, C55/67	82
Tab. 6.7 - Posouzení nosníku na smyk L25, C55/67	82
Tab. 6.8 - Výpočet ideálního průřezu L25, C90/105	85
Tab. 6.9 - Výpočet délky kotvení předem předpjaté výztuže L25, C90/105	85
Tab. 6.10 - Výpočet krátkodobých ztrát L25, C90/105	86
Tab. 6.11 - Výpočet dlouhodobých ztrát L25, C90/105	87
Tab. 6.12 - Posouzení nosníku-SLS L25, C90/105	88
Tab. 6.13 - Posouzení nosníku na ohyb L25, C90/105	89
Tab. 6.14 - Posouzení nosníku na smyk L25, C90/105	89
Tab. 6.15 - Srovnání napětí ve výztuži v čase t L=25 m	90

Seznam příloh

Příloha A1 – VÝPOČET DOTVAROVÁNÍ A SMRŠŤOVÁNÍ BETONU C55/67 L=15 M
Příloha A2 – VÝPOČET DOTVAROVÁNÍ A SMRŠŤOVÁNÍ BETONU C90/105 L=15 M
Příloha A3 – VÝPOČET DOTVAROVÁNÍ A SMRŠŤOVÁNÍ BETONU C55/67 L=20 M
Příloha A4 – VÝPOČET DOTVAROVÁNÍ A SMRŠŤOVÁNÍ BETONU C90/105 L=20 M
Příloha A5 – VÝPOČET DOTVAROVÁNÍ A SMRŠŤOVÁNÍ BETONU C55/67 L=25 M
Příloha A6 – VÝPOČET DOTVAROVÁNÍ A SMRŠŤOVÁNÍ BETONU C90/105 L=25 M

Příloha B1 – VÝKRES TVARU L=15 m, M1:50, M1:25

Příloha B2 – VÝKRES PŘEDPÍNACÍ VÝZTUŽE L=15 m, M1: 50, M1:25

Příloha B3 – VÝKRES BETONÁŘSKÉ VÝZTUŽE L= 15 m, M1: 50, M1:25

Příloha C1 – VÝKRES TVARU L=20 m, M1: 50, M1:25

Příloha C2 – VÝKRES PŘEDPÍNACÍ VÝZTUŽE L=20 m, M1: 50, M1:25

Příloha C3 – VÝKRES BETONÁŘSKÉ VÝZTUŽE L= 20 m, M1: 50, M1:25

Příloha D1 – VÝKRES TVARU L=25 m, M1: 50, M1:25

Příloha D2 – VÝKRES PŘEDPÍNACÍ VÝZTUŽE L=25 m, M1: 50, M1:25

Příloha D3 – VÝKRES BETONÁŘSKÉ VÝZTUŽE L= 25 m, M1: 50, M1:25